

Manual do Simulador do Processador P3

Guilherme Arroz

José Monteiro

Arlindo Oliveira

Instituto Superior Técnico
Lisboa, Portugal

Fevereiro 2005

Conteúdo

1	Introdução	3
2	Arquitectura do Processador P3	3
2.1	Registos	3
2.2	Bits de Estado	4
2.3	Memória	4
2.4	Entradas/Saídas	4
2.5	Interrupções	5
3	Assembler	6
3.1	Evocação	6
3.2	Conjunto de Instruções	6
3.3	Constantes	7
3.4	Modos de Endereçamento	8
3.5	Etiquetas	9
3.6	Comentários	9
3.7	Pseudo-Instruções	9
3.8	Instruções Assembly	11
4	Simulador	18
4.1	Evocação	18
4.2	Ambiente	18
4.2.1	Menus	19
4.2.2	Contadores de Instrução e Ciclos de Relógio	21
4.2.3	Registos	21
4.2.4	Conteúdo da Memória	21
4.2.5	Programa Desassemblado	22
4.2.6	Comandos de Execução e Interrupção	22
4.3	Depuração	23
4.4	Unidade de Controlo	23
4.4.1	Registos Internos à Unidade de Controlo	23
4.4.2	Botão Clock	25
4.5	Micro-Programação	25
4.6	Dispositivos de Entrada e Saída	26
4.6.1	Janela Texto	26
4.6.2	Janela Placa	27
4.6.3	Temporizador	28
4.6.4	Máscara de Interrupções	29
A	Formatos das Instruções Assembly	31
B	Conteúdo das ROMs de Controlo	35

1 Introdução

Este documento descreve a operação do simulador para o processador P3. Este programa permite simular a nível funcional o processador descrito nos Capítulos 11 e 12 do livro:

Introdução aos Sistemas Digitais e Microprocessadores
G. Arroz, J. Monteiro e A. Oliveira
IST Press, 1ª Edição, 2005

O simulador P3 é constituído por dois programas, pelo simulador propriamente dito, *p3sim*, e por um *assembler*, *p3as*. O programa *p3as* converte programas descritos na linguagem *assembly* daquele processador para um ficheiro objecto. Uma vez convertido para este formato objecto, o programa pode ser carregado para o simulador *p3sim*. O simulador *p3sim* permite não só a execução normal e passo-a-passo do programa, mas também a execução de apenas um ciclo de relógio. Este modo de funcionamento é útil para se observar a evolução passo-a-passo do micro-código. De forma a tornar mais interessante a interacção com o micro-processador, foram definidos um conjunto de dispositivos de entrada e saída. Em particular, este simulador emula todas as entradas e saídas da placa DIO5 da Digilent, Inc, utilizada nas aulas de laboratório da disciplina de Arquitectura de Computadores da Licenciatura em Engenharia Informática e de Computadores do Instituto Superior Técnico.

Este documento está dividido em três partes. Na primeira parte introduz-se a arquitectura do processador P3. Na segunda parte, descreve-se a utilização do *assembler p3as*. Na terceira parte, é apresentado o simulador *p3sim*.

2 Arquitectura do Processador P3

2.1 Registos

O processador P3 contém os seguintes registos visíveis ao programador:

R0–R7 : registos de uso genérico. O registo R0 não pode ser alterado e tem sempre o valor 0.

PC: *program counter*, contém o endereço da próxima instrução a executar. Não pode ser acedido directamente com instruções *assembly*, sendo alterado apenas com instruções de controlo da sequência de execução.

SP: *stack pointer*, apontador para o topo da pilha. É utilizado também de forma indirecta, podendo apenas ser manipulado directamente (para a sua inicialização) através de uma instrução `MOV SP, R[1–7]`.

RE: *registo de estado*, registo onde estão guardados os bits de estado (*flags*) do processador, descritos na secção seguinte. Também não existem instruções para manipular este registo directamente.

Todos estes registos são inicializados a 0 após um *reset* do processador.

2.2 Bits de Estado

Do ponto de vista do programador, existem 5 bits de estado, ou *flags*, neste processador. Os bits de estado estão guardados nos 5 bits menos significativos do registo **RE**, contendo os restantes bits deste registo o valor 0.

O significado dos bits de estado, do bit de menor para o de maior peso do registo **RE**, é:

- O: *overflow* ou excesso, indica que o resultado da última operação aritmética excede a capacidade do operando destino. Por outras palavras, o resultado não pode ser representado em complemento para 2 com o número de bits disponíveis no operando destino, ficando este, portanto, com um valor incorrecto.
- N: *negative* ou sinal, indica que o resultado da última operação foi negativo, o que em complemento para 2 é equivalente a dizer que o bit mais significativo do operando destino ficou a 1.
- C: *carry* ou transporte, indica que a última operação gerou um bit de transporte para além da última posição do operando destino. Também pode ser modificado por software através das instruções **STC**, **CLC** e **CMC**.
- Z: *zero*, indica que o resultado da última operação foi 0.
- E: *enable interrupts*, habilita ou não as interrupções, conforme for 1 ou 0. Este é o único bit de estado que só é alterado por software, através das instruções **ENI** e **DSI**.

2.3 Memória

O espaço de memória endereçável é de 64k palavras (barramento de endereços de 16 bits), em que cada palavra é de 16 bits (largura do barramento de dados). O acesso a uma posição de memória pode ser feito com qualquer instrução, usando o modo de endereçamento apropriado.

2.4 Entradas/Saídas

O espaço de entradas e saídas (I/O) é *memory mapped*. Os endereços de memória a partir de **FF00h** estão reservados para o espaço de entradas/saídas. Assim, qualquer instrução pode ter acesso a um qualquer dispositivo de entrada/saída que esteja mapeado neste espaço superior de memória do processador.

No caso do presente simulador, os dispositivos de entrada/saída disponíveis são:

- janela de texto: dispositivo que fornece uma interface com o teclado e monitor do computador. Tem 4 portos de interface:
 - leitura, endereço **FFFFh** : porto que permite receber caracteres teclados na janela de texto;
 - escrita, endereço **FFFEh** : porto que permite escrever um dado carácter na janela de texto;
 - estado, endereço **FFFDh** : porto que permite testar se houve alguma tecla premida na janela de texto;

- controlo, endereço **FFFCh** : porto que permite posicionar o cursor na janela de texto, posição esta onde será escrito o próximo carácter.
- botões de pressão: conjunto de 15 interruptores de pressão. A activação de cada um destes botões gera uma interrupção com o correspondente vector de interrupção.
- interruptores, endereço **FFF9h** : conjunto de 8 interruptores cujo estado pode ser obtido por leitura deste endereço.
- LEDs, endereço **FFF8h** : cada bit da palavra escrita neste porto define quais dos 16 LEDs estão ligados.
- *display* de 7 segmentos, endereços **FFF0** , **FFF1h** , **FFF2h** e **FFF3h** : cada um destes portos de escrita controla um conjunto de 7 LEDs que formam um *display*.
- *display* de cristal líquido ou LCD: *display* de texto com 16 colunas e duas linhas. Tem 2 portos de escrita:
 - endereço **FFF5h** : porto que permite escrever um dado carácter no *display*;
 - endereço **FFF4h** : porto que permite posicionar o cursor no *display*, posição esta onde será escrito o próximo carácter.
- máscara de interrupções, endereço **FFFAh** : posição de um filtro que permite seleccionar individualmente quais dos 16 primeiros vectores de interrupção (de 0 a 15) estão habilitados. Após um *reset*, todos os bits da máscara de interrupção estão a 0.
- temporizador: dispositivo que fornece a geração de uma interrupção ao fim de um intervalo de tempo real, especificado pelo utilizador. Tem 2 portos de interface:
 - controlo, endereço **FFF7h** : porto que permite arrancar (colocando o bit menos significativo a 1) ou parar (colocando esse bit a 0) o temporizador.
 - valor de contagem, endereço **FFF6h** : porto que permite indicar o número de intervalos de 100ms ao fim do qual o temporizador gerará uma interrupção.

O controlo destes dispositivos é explicado em maior detalhe na Secção 4.6.

2.5 Interrupções

O simulador disponibiliza 15 botões para a geração de interrupções externas (para além destas, o simulador tem apenas mais uma fonte de interrupções, o temporizador). Qualquer destas interrupções provoca a activação de um sinal **INT**, ligado a um dos pinos externos do processador. No final da execução de cada instrução, este sinal é testado para verificar se existe alguma interrupção pendente. Nesse caso, são efectuados dois testes:

- o bit de estado E (*enable interrupts*) tem que estar activo.
- o bit da máscara de interrupções correspondente a este vector de interrupção tem que estar activo.

Caso estas duas condições se verifiquem, é chamada a rotina de serviço dessa interrupção, determinada pelo vector de interrupção, lido do barramento de dados. Os endereços das rotinas de interrupção encontram-se na Tabela de Vectores de Interrupção, uma tabela com 256 posições guardada em memória a partir do endereço `FE00h`. Assim, o contador de programa PC é carregado com o valor da posição de memória $M[FE00h+vector]$.

Por omissão, o vector de interrupção associado a cada um dos 15 botões de interrupção é simplesmente o índice do botão. Porém, este pode ser alterado pelo utilizador através da interface do simulador. Esta interface permite também desabilitar individualmente cada um dos botões de interrupção.

O vector de interrupção associado ao temporizador é o 15, e este é fixo.

A chamada à rotina de serviço da interrupção guarda o registo RE na pilha e desabilita as interrupções ($E=0$). É da responsabilidade do programador salvar qualquer registo que seja modificado nesta rotina. A rotina deve ser terminada com a instrução RTI que repõe o valor de RE a partir da pilha.

3 Assembler

3.1 Evocação

O modo de evocação do *assembler* p3as é simplesmente:

```
$ p3as <nome>.as
```

O nome do ficheiro *assembly* tem que ter extensão .as. Caso não haja erros de *assembly*, são gerados dois ficheiros:

<nome>.exe : ficheiro com o código binário, pronto a ser executado no simulador p3sim.

<nome>.lis : ficheiro com o valor atribuído às referências usadas no programa *assembly*.

3.2 Conjunto de Instruções

As instruções *assembly* aceites pelo *assembler* p3as são as apresentadas na Tabela 11.4 do livro. Para além destas instruções, o *assembler* reconhece um conjunto de comandos (chamados de *pseudo-instruções*, Tabela 11.16 do livro) que, embora não gerem código binário, permitem reservar espaço para variáveis ou tornar o código mais legível. O total de instruções reconhecidas pelo p3as encontram-se na Tabela 1, agrupadas por classes.

A condição .cond nas instruções de salto condicional (BR. cond, JMP. cond e CALL. cond) pode ser uma de:

O, NO: bit de estado excesso (*overflow*)

N, NN: bit de estado sinal (*negative*)

C, NC: bit de estado transporte (*carry*)

Z, NZ: bit de estado zero são atendidas (*enable*)

I, NI: bit que indica se existe alguma interrupção pendente

P, NP: resultado positivo ($\bar{Z} \wedge \bar{N}$)

Pseudo	Aritméticas	Lógicas	Deslocamento	Controlo	Transfer.	Genéricas
ORIG	NEG	COM	SHR	BR	MOV	NOP
EQU	INC	AND	SHL	BR. <i>cond</i>	MVBH	ENI
WORD	DEC	OR	SHRA	JMP	MVBL	DSI
STR	ADD	XOR	SHLA	JMP. <i>cond</i>	XCH	STC
TAB	ADDC	TEST	ROR	CALL	PUSH	CLC
	SUB		ROL	CALL. <i>cond</i>	POP	CMC
	SUBB		RORC	RET		
	CMP		ROLC	RETN		
	MUL			RTI		
	DIV			INT		

Tabela 1: Conjunto de instruções do P3 .

Estas combinações permitem testar cada uma destas condições e realizar o salto caso a condição seja a 1 ou a 0, respectivamente.

As instruções aritméticas assumem os operandos em formato de complemento para 2. As excepções a esta regra são a multiplicação e a divisão que assumem números sem sinal. No caso destas duas operações, terá que ser o programador a ter o cuidado de manipular o sinal à parte.

Neste conjunto, há instruções de 0, 1 e 2 operandos. Nas instruções de 2 operandos, um deles tem que ser necessariamente um registo. O outro operando pode ter diversos modos de endereçamento, como se explica em seguida. Os detalhes do funcionamento de cada instrução (a operação realizada e os bits de estado alterados) são também apresentados mais adiante.

3.3 Constantes

O facto do processador P3 ser um processador de 16 bits define os valores máximos possíveis de especificar para uma constante. Assim, o intervalo válido para inteiros positivos será de 0 a $2^{16} - 1$ e para inteiros em complemento para 2 de -2^{15} a $+2^{15} - 1$.

Valores constantes podem ser especificados de três formas no código *assembly*:

Valor numérico em binário: para uma constante numérica ser interpretada em binário deve ser terminada com a letra b; são válidos valores entre $-100000000000000b$ e $111111111111111b$.

Valor numérico em octal: para uma constante numérica ser interpretada em octal deve ser terminada com a letra o; são válidos valores entre $-100000o$ e $177777o$.

Valor numérico em decimal: qualquer valor inteiro entre -32768 e 65535 . Pode opcionalmente ser terminada com a letra d, embora tal seja assumido quando nenhuma outra base for indicada;

Valor numérico em hexadecimal: para uma constante numérica ser interpretada em hexadecimal deve ser terminada com a letra h; são válidos valores entre $-8000h$ e $FFFFh$.

Caracter alfanumérico: um carácter entre plicas, por exemplo, 'g' , é convertido para o seu código ASCII.

Notar, no entanto, que o uso de constantes no meio do código *assembly* (ou de qualquer outra linguagem de programação) é extremamente desaconselhável. Em vez disso, deve-se usar o comando `EQU` para definir constantes (ver Secção 3.7). Esta prática, por um lado, torna o código mais legível, pois o símbolo associado à constante, se convenientemente escolhido, dá uma pista sobre a acção que se está a tomar, e, por outro lado, permite uma actualização mais fácil do código, pois constantes que estão associadas não têm que ser alteradas em vários sítios dentro do código (porventura falhando-se alguma), mas simplesmente na linha do comando `EQU`.

3.4 Modos de Endereçamento

Os operandos usados nas instruções *assembly* podem ter 7 modos de endereçamento, a seguir indicados. O significado dos símbolos usados nesta secção é:

- op*: operando;
- Rx*: registo *Rx*. O processador tem 8 registos visíveis para o programador, portanto $0 \leq x \leq 7$, em que *R0* é sempre igual a 0;
- W*: constante de valor *W* (de 16 bits);
- M[y]*: referência à posição de memória com endereço *y*;
- PC*: registo contador de programa (*program counter*);
- SP*: registo do apontador para o topo da pilha (*stack pointer*).

Endereçamento por Registo

$$op = Rx$$

O valor do operando é o conteúdo do registo *Rx*.

Endereçamento por Registo Indirecto

$$op = M[Rx]$$

O valor do operando é o conteúdo da posição de memória cujo endereço é o conteúdo do registo *Rx*.

Endereçamento Imediato

$$op = W$$

O valor do operando é *W*. Naturalmente, este modo não pode ser usado como operando destino.

Endereçamento Directo

$$op = M[W]$$

O valor do operando é o conteúdo da posição de memória com o endereço *W*.

Endereçamento Indexado

$$op = M[Rx+W]$$

O valor do operando é o conteúdo da posição de memória com o endereço resultante da soma de *W* com o conteúdo de *Rx*, *Rx+W*. Nota: a versão *W+Rx* não é aceite pelo *assembler*.

Endereçamento Relativo

$$op = M[PC+W]$$

O valor do operando é o conteúdo da posição de memória com o endereço resultante da soma de *W* com o conteúdo de *PC*, *PC+W*. Nota: a versão *W+PC* não é aceite pelo *assembler*.

Endereçamento Baseado

$$op = M[SP+W]$$

O valor do operando é o conteúdo da posição de memória com o endereço resultante da soma de W com o conteúdo de SP , $SP+W$. Nota: a versão $W+SP$ não é aceite pelo *assembler*.

Na utilização destes modos de endereçamento, há as seguintes restrições:

- no caso das instruções com 2 operandos, para um deles tem que ser necessariamente usado o endereçamento por registo.
- o modo imediato não pode ser usado como operando destino, por razões óbvias.
- as instruções `MUL` e `DIV`, por usarem como destino ambos os operandos (ver descrição adiante), não podem usar o modo imediato em nenhum dos operandos. Além disso, os dois operandos não devem ser o mesmo devido a limitações na arquitectura do processador que provoca que parte do resultado se perca.

3.5 Etiquetas

Para referenciar uma dada posição de memória, pode-se colocar uma etiqueta (*label*) antes da instrução que vai ficar nessa posição. A etiqueta consiste num nome (conjunto de caracteres alfanuméricos, mais o carácter '_', em que o primeiro não pode ser um algarismo) seguida de ':'. Por exemplo,

```
VoltaAqui:    INC    R1
```

Se agora se quiser fazer um salto para esta instrução, pode-se usar:

```
BR VoltaAqui
```

em vez de se calcular o endereço em que a instrução `INC R1` ficará depois da assemblagem.

Para facilitar a leitura do código *assembly*, convencionou-se que estas etiquetas são palavras capitalizadas todas juntas: primeira letra de cada palavra em maiúsculas e restantes em minúsculas, como no exemplo anterior `VoltaAqui`.

O valor atribuído às etiquetas pode ser consultado no ficheiro com a extensão `.lis`, gerado quando da execução do `p3as`.

3.6 Comentários

Um comentário começa com o carácter ';', que indica ao *assembler* que todo o texto que se segue nessa linha deverá ser ignorado no processo de tradução do código *assembly*.

3.7 Pseudo-Instruções

Chama-se pseudo-instruções ao conjunto de comandos reconhecidos pelo *assembler* que não são instruções *assembly*, mas que permitem dar ao *assembler* um conjunto de informações e directivas necessárias para a sua correcta execução ou para simplificar a sua utilização. A função das pseudo-instruções é, por um lado, controlar a forma como o código é gerado (por exemplo, indicando as posições de memória onde colocar o executável ou reservando posições de memória para dados), por outro lado, permitir definir símbolos (constantes ou posições de memória) que tornam o código mais legível e mais fácil de programar. Nesta secção descrevem-se as pseudo-instruções usadas pelo *assembler p3as*.

ORIG

Formato: ORIG <endereço>

Função: o comando ORIG permite especificar no campo <endereço> a primeira posição de memória em que um bloco de programa ou dados é carregado em memória. Este comando pode aparecer várias vezes no código, permitindo que se definam blocos em diferentes zonas de memória.

EQU

Formato: <símbolo> EQU <const>

Função: o comando EQU permite associar um valor *const* a um *símbolo*. Convenciona-se que estes símbolos são palavras todas em maiúsculas, com uso possível do carácter de separação '_', por exemplo, NUM_LINHAS.

Nota: Este comando associa um nome a uma constante. Isto permite que, no código *assembly*, em vez de um valor numérico que em geral não dá muita informação, se use um nome que pode indicar que tipo de acção se está a tomar nesse ponto do código. Adicionalmente, permite que numa posterior alteração baste alterar a linha do comando EQU para que a alteração se propague pelo código todo.

WORD

Formato: <etiqueta> WORD <const>

Função: o comando WORD permite reservar uma posição de memória para conter uma variável do programa *assembly*, associando a essa posição o nome especificado em <etiqueta>. O campo *const* indica o valor a que essa posição de memória deve ser inicializada. Convenciona-se que estas etiquetas são palavras capitalizadas todas juntas: primeira letra de cada palavra em maiúsculas e restantes em minúsculas, por exemplo CicloInterno.

STR

Formato: <etiqueta> STR '<texto>' | <const> [, '<texto>' | <const>]

Função: o comando STR coloca em posições de memória consecutivas o texto que estiver entre aspas ou o valor de <const>. No caso de <texto>, o código ASCII de cada carácter entre aspas fica numa posição de memória (portanto usa tantas posições de memória quantos os caracteres em <texto>). Podem-se usar mais do que um parâmetro, separados por vírgulas, sendo feita a sua concatenação em memória. <etiqueta> fica com o endereço do primeiro carácter. A convenção para os nomes destas etiquetas é o mesmo que para WORD.

TAB

Formato: <etiqueta> TAB <const>

Função: o comando TAB reserva o número de posições de memória especificados no campo <const> sem as inicializar com qualquer valor. <etiqueta> fica com o endereço da primeira posição. A convenção para os nomes destas etiquetas é o mesmo que para WORD e STR.

3.8 Instruções Assembly

As instruções *assembly* válidas para o micro-processador P3 são apresentadas em seguida por ordem alfabética. É indicado o formato da instrução, a função realizada e as *flags* alteradas (Z, zero; C, *carry* ou transporte; N, *negative* ou sinal; O, *overflow* ou excesso; E, *enable* das interrupções).

ADD

Formato: ADD op1, op2

Flags: ZCNO

Acção: $op1 \leftarrow op1 + op2$, soma a *op1* o valor de *op2*.

ADDC

Formato: ADDC op1, op2

Flags: ZCNO

Acção: $op1 \leftarrow op1 + op2 + C$, igual a ADD excepto que soma mais um caso o bit de estado transporte esteja a 1.

AND

Formato: AND op1, op2

Flags: ZN

Acção: $op1 \leftarrow op1 \wedge op2$. Faz o AND lógico bit-a-bit dos dois operandos.

BR

Formato: BR <deslocamento>

Flags: Nenhuma

Acção: $PC \leftarrow PC + \text{<deslocamento>}$, *branch*, salto relativo incondicional para <deslocamento> posições de memória à frente (ou atrás, se <deslocamento> for negativo) da posição actual. O valor de <deslocamento> tem que estar compreendido entre -32 e 31. Normalmente <deslocamento> é especificado com uma etiqueta.

BR.cond

Formato: BR. cond <deslocamento>

Flags: Nenhuma

Acção: salto relativo condicional baseado no valor de um dada condição. As versões disponíveis são:

Condição	Transporte	Sinal	Excesso	Zero	Interrupção	Positivo
Verdade	BR.C	BR.N	BR.O	BR.Z	BR.I	BR.P
Falso	BR.NC	BR.NN	BR.NO	BR.NZ	BR.NI	BR.NP

Caso a condição se verifique, a próxima instrução a ser executada será a do endereço $PC + \text{<deslocamento>}$ ($PC \leftarrow PC + \text{<deslocamento>}$). Caso contrário, funciona como um NOP. O valor de <deslocamento> tem que estar compreendido entre -32 e 31. Normalmente <deslocamento> é especificado com uma etiqueta.

CALL

Formato: CALL <endereço>

Flags: Nenhuma

Acção: $M[SP] \leftarrow PC$, $SP \leftarrow SP - 1$, $PC \leftarrow \langle \text{endereço} \rangle$, chamada a subrotina com início em <endereço>. O endereço da instrução seguinte ao CALL é colocado na pilha e é feito uma salto para a subrotina. Normalmente <endereço> é especificado com uma etiqueta.

CALL.cond

Formato: CALL. cond <endereço>

Flags: Nenhuma

Acção: chamada condicional a uma subrotina baseado no valor de um dado bit de estado. As versões disponíveis são:

Condição	Transporte	Sinal	Excesso	Zero	Interrupção	Positivo
Verdade	CALL.C	CALL.N	CALL.O	CALL.Z	CALL.I	CALL.P
Falso	CALL.NC	CALL.NN	CALL.NO	CALL.NZ	CALL.NI	CALL.NP

Caso a condição se verifique, comporta-se como uma instrução CALL. Caso contrário, funciona como um NOP. Normalmente <endereço> é especificado com uma etiqueta.

CLC

Formato: CLC

Flags: C

Acção: clear C, coloca o bit de estado transporte a 0.

CMC

Formato: CMC

Flags: C

Acção: complementa o valor do bit de estado transporte.

CMP

Formato: CMP op1, op2

Flags: ZCNO

Acção: compara os operandos op1 e op2, actualizando os bits de estado. Efectua a mesma operação que SUB op1, op2 sem alterar nenhum dos operandos. É habitualmente seguida no programa por uma instrução BR. cond, JMP. cond ou CALL. cond

COM

Formato: COM op

Flags: ZN

Acção: $op \leftarrow \overline{op}$, faz o complemento bit-a-bit de op.

DEC

Formato: DEC op

Flags: ZCNO

Acção: $op \leftarrow op - 1$, decrementa op em uma unidade.

DIV

Formato: DIV op1, op2

Flags: ZCNO

Acção: executa a divisão inteira de *op1* por *op2*, deixando o resultado em *op1* e o resto em *op2*. Assume operandos sem sinal. O bit de estado O fica a 1 no caso de divisão por 0. Os bit de estado C e N ficam sempre a 0. Uma vez que ambos os operandos são usados para guardar o resultado, nenhum deles pode estar no modo imediato. Pela mesma razão, os dois operandos não devem ser o mesmo pois parte do resultado será perdido.

DSI

Formato: DSI

Flags: E

Acção: *disable interrupts*, coloca o bit de estado E a 0, inibindo assim as interrupções.

ENI

Formato: ENI

Flags: E

Acção: *enable interrupts*, coloca o bit de estado E a 1, permitindo assim as interrupções.

INC

Formato: INC op

Flags: ZCNO

Acção: $op \leftarrow op + 1$, incrementa *op* em uma unidade.

INT

Formato: INT const

Flags: EZCNO

Acção: $M[SP] \leftarrow RE$, $SP \leftarrow SP - 1$, $M[SP] \leftarrow PC$, $SP \leftarrow SP - 1$, $RE \leftarrow 0$, $PC \leftarrow M[FE00h+const]$, gera uma interrupção com o vector *const*. Este vector tem que estar compreendido entre 0 e 255. Esta interrupção ocorre sempre, independentemente do valor do bit de estado E, *enable interrupts*.

JMP

Formato: JMP <endereço>

Flags: Nenhuma

Acção: $PC \leftarrow \text{<endereço>}$, *jump*, salto absoluto incondicional para a posição de memória com o valor <endereço>. Normalmente <endereço> é especificado com uma etiqueta.

JMP.cond

Formato: JMP. cond <endereço>

Flags: Nenhuma

Acção: salto absoluto condicional baseado no valor de um dada condição. As versões disponíveis são:

Condição	Transporte	Sinal	Excesso	Zero	Interrupção	Positivo
Verdade	JMP.C	JMP.N	JMP.O	JMP.Z	JMP.I	JMP.P
Falso	JMP.NC	JMP.NN	JMP.NO	JMP.NZ	JMP.NI	JMP.NP

Caso a condição se verifique, a próxima instrução a ser executada será a apontada por $\langle \text{endereço} \rangle$ ($PC \leftarrow \langle \text{endereço} \rangle$). Caso contrário, funciona como um **NOP**. Normalmente $\langle \text{endereço} \rangle$ é especificado com uma etiqueta.

MOV

Formato: **MOV** $op1, op2$

Flags: Nenhuma

Ação: $op1 \leftarrow op2$, copia o conteúdo de $op2$ para $op1$.

Para além dos modos de endereçamento comuns a todas as instruções (conforme Secção 3.4), esta instrução permite ler e escrever no registo apontador da pilha **SP**, mas apenas em conjugação com o modo de endereçamento por registo: **MOV SP, Rx** e **MOV Rx, SP**. A primeira destas instruções será necessária no início de todos os programas que utilizem a pilha.

MUL

Formato: **MUL** $op1, op2$

Flags: ZCNO

Ação: $op1|op2 \leftarrow op1 \times op2$, multiplica $op1$ por $op2$, assumindo-os como números sem sinal. Como o resultado necessita de 32 bits são usados os dois operandos para o guardar: $op1$ fica com o 16 mais significativos e $op2$ com os 16 menos significativos. O bit de estado **Z** é actualizado de acordo com o resultado, os restantes ficam a 0. Uma vez que ambos os operandos são usados para guardar o resultado, nenhum deles pode estar no modo imediato. Pela mesma razão, os dois operandos não devem ser o mesmo pois parte do resultado será perdido.

MVBH

Formato: **MVBH** $op1, op2$

Flags: Nenhuma

Ação: $op1 \leftarrow (op1 \wedge 00FFh) \vee (op2 \wedge FF00h)$, copia o octeto de maior peso de $op2$ para o octeto de maior peso de $op1$.

MVBL

Formato: **MVBL** $op1, op2$

Flags: Nenhuma

Ação: $op1 \leftarrow (op1 \wedge FF00h) \vee (op2 \wedge 00FFh)$, copia o octeto de menor peso de $op2$ para o octeto de menor peso de $op1$.

NEG

Formato: **NEG** op

Flags: ZCNO

Ação: $op \leftarrow -op$, troca o sinal (complemento para 2) do operando op .

NOP

Formato: **NOP**

Flags: Nenhuma

Ação: *no operation*, não altera nada.

OR

Formato: OR $op1, op2$

Flags: ZN

Acção: $op1 \leftarrow op1 \vee op2$, faz o OR lógico bit-a-bit dos dois operandos.

POP

Formato: POP op

Flags: Nenhuma

Acção: $SP \leftarrow SP + 1, op \leftarrow M[SP]$, copia o valor do topo da pilha para op e reduz o tamanho desta.

PUSH

Formato: PUSH op

Flags: Nenhuma

Acção: $M[SP] \leftarrow op, SP \leftarrow SP - 1$, coloca op no topo da pilha.

RET

Formato: RET

Flags: Nenhuma

Acção: $SP \leftarrow SP + 1, PC \leftarrow M[SP]$, retorna de uma subrotina. O endereço de retorno é obtido do topo da pilha.

RETN

Formato: RETN $const$

Flags: Nenhuma

Acção: $SP \leftarrow SP + 1, PC \leftarrow M[SP], SP \leftarrow SP + const$, retorna de uma subrotina libertando $const$ posições do topo da pilha. Esta instrução permite retornar de uma subrotina retirando automaticamente parâmetros que tenham sido passados para essa subrotina através da pilha. O valor de $const$ tem que estar compreendido entre 0 e 1023 (10 bits).

ROL

Formato: ROL $op, const$

Flags: ZCN

Acção: *rotate left*, faz a rotação à esquerda dos bits de op o número de vezes indicado por $const$. Mesma operação que o deslocamento simples, *SHL*, mas os bits da esquerda não se perdem, sendo colocados nas posições mais à direita de op . O valor de $const$ tem que estar compreendido entre 1 e 16.

ROLC

Formato: ROLC $op, const$

Flags: ZCN

Acção: *rotate left with carry*, mesma operação que *ROL*, mas envolvendo o bit de estado transporte: o valor de C é colocado na posição mais à direita de op e o bit mais à esquerda de op é colocado em C. O valor de $const$ tem que estar compreendido entre 1 e 16.

ROR

Formato: ROR *op*, *const*

Flags: ZCN

Acção: *rotate right*, faz a rotação à direita dos bits de *op* o número de vezes indicado por *const*. Mesma operação que o deslocamento simples, *SHR*, mas os bits da direita não se perdem, sendo colocados nas posições mais à esquerda de *op*. O valor de *const* tem que estar compreendido entre 1 e 16.

RORC

Formato: RORC *op*, *const*

Flags: ZCN

Acção: *rotate right with carry*, mesma operação que ROR, mas envolvendo o bit de estado transporte: o valor de C é colocado na posição mais à esquerda de *op* e o bit mais à direita de *op* é colocado em C. O valor de *const* tem que estar compreendido entre 1 e 16.

RTI

Formato: RTI

Flags: EZCNO

Acção: $SP \leftarrow SP + 1$, $PC \leftarrow M[SP]$, $SP \leftarrow SP + 1$, $RE \leftarrow M[SP]$, *return from interrupt*, retorna de uma rotina de serviço a uma interrupção. O endereço de retorno e os bits de estado são obtidos do topo da pilha, por esta ordem.

SHL

Formato: SHL *op*, *const*

Flags: ZCN

Acção: *shift left*, deslocamento à esquerda dos bits de *op* o número de vezes indicado por *const*. Os bits mais à esquerda de *op* são perdidos e é colocado 0 nas posições mais à direita. O bit de estado transporte fica com o valor do último bit perdido. O valor de *const* tem que estar compreendido entre 1 e 16.

SHLA

Formato: SHLA *op*, *const*

Flags: ZCNO

Acção: *shift left arithmetic*, mesma operação que SHL, mas actualizando os bits de estado correspondentes às operações aritméticas. Permite realizar de forma expedita uma multiplicação de *op* por 2^n . O valor de *const* tem que estar compreendido entre 1 e 16.

SHR

Formato: SHR *op*, *const*

Flags: ZCN

Acção: *shift right*, deslocamento à direita dos bits de *op* o número de vezes indicado por *const*. Os bits mais à direita de *op* são perdidos e são colocados 0 nas posições mais à esquerda. O bit de estado transporte fica com o valor do último bit perdido. O valor de *const* tem que estar compreendido entre 1 e 16.

SHRA

Formato: SHRA op, const

Flags: ZCNO

Acção: *shift right arithmetic*, deslocamento à direita dos bits de op, mas mantendo o bit de sinal. Os bits mais à direita de op são perdidos, mas os bits mais à esquerda mantêm o valor anterior. O bit de estado transporte fica com o valor do último bit perdido. Permite realizar de forma expedita uma divisão de op por 2^n . const entre 1 e 16.

STC

Formato: STC

Flags: C

Acção: set C, coloca o bit de estado transporte a 1.

SUB

Formato: SUB op1, op2

Flags: ZCNO

Acção: $op1 \leftarrow op1 - op2$, subtrai a op1 o valor de op2.

SUBB

Formato: SUBB op1, op2

Flags: ZCNO

Acção: $op1 \leftarrow op1 - op2 - C$, igual a SUB excepto que subtrai mais um caso o bit de estado transporte esteja a 1.

TEST

Formato: TEST op1, op2

Flags: ZN

Acção: testa o bits dos operandos op1 e op2, actualizando os bits de estado. Efectua a mesma operação que AND op1, op2 sem alterar nenhum dos operandos.

XCH

Formato: XCH op1, op2

Flags: Nenhuma

Acção: *exchange op1/op2*, $op1 \leftarrow op2$, $op2 \leftarrow op1$, troca os valores de op1 e op2.

XOR

Formato: XOR op1, op2

Flags: ZN

Acção: $op1 \leftarrow op1 \oplus op2$. Faz a operação lógica EXCLUSIVE-OR bit-a-bit dos dois operandos.

4 Simulador

4.1 Evocação

O modo de evocação do *simulador p3sim* é simplesmente:

```
$ p3sim [<nome>.exe]
```

em que *<nome>.exe* é o executável gerado pelo assembler *p3as* que se pretende simular. Os parêntesis rectos indicam que o ficheiro *<nome>.exe* é opcional, o programa a simular pode também ser carregado através da interface do simulador.

Para sair do simulador deve-se escolher a opção *Sai* do menu *Ficheiro*.

4.2 Ambiente

A evocação do simulador lança uma janela como a representada na Figura 1.

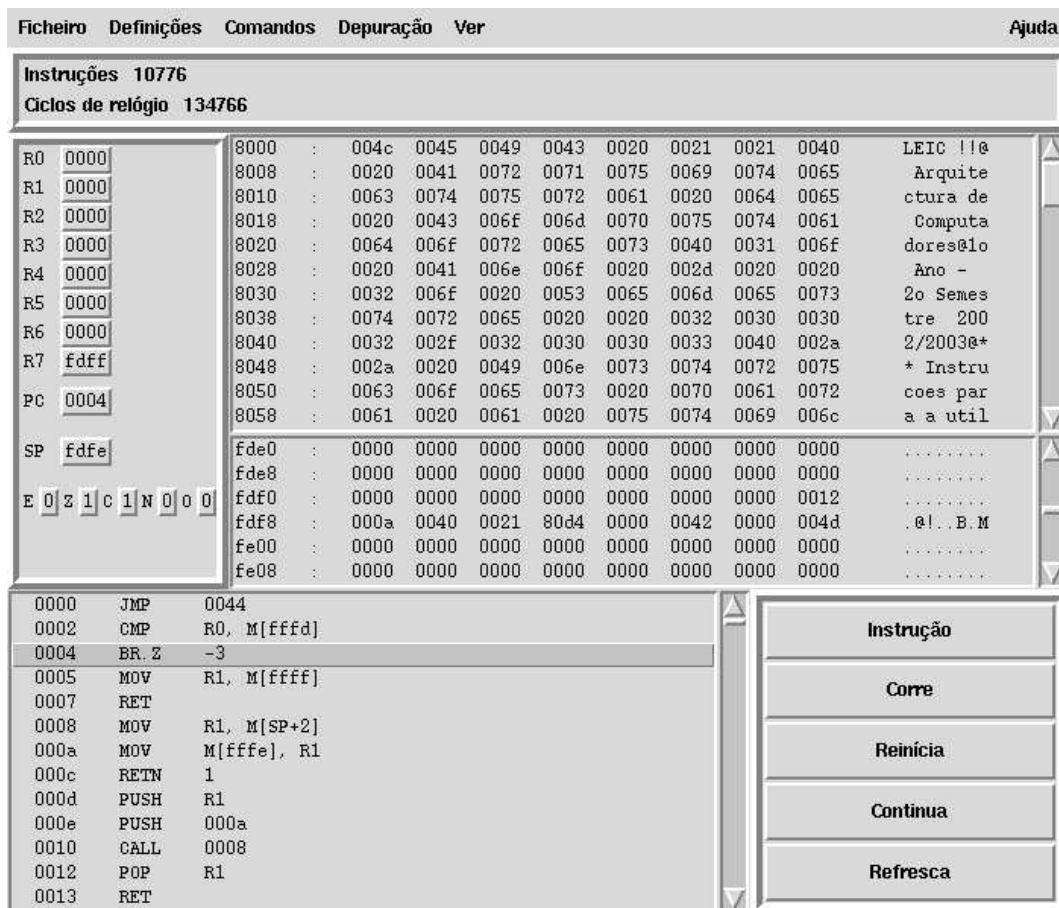


Figura 1: Interface do simulador.

Nesta janela existem 6 secções diferentes que se explicam em seguida, no sentido de cima para baixo na janela.

4.2.1 Menus

Na parte superior da janela existem 5 menus que se abrem quando seleccionados: *Ficheiro*, *Definições*, *Comandos*, *Depuração* e *Ver*. Qualquer destes menus pode ser mantido aberto seleccionando a primeira linha (a tracejado).

As opções de cada menu são as seguintes:

- **Ficheiro:**

as opções deste menu estão relacionadas com a manipulação de ficheiros, quer para leitura quer para escrita.

Carrega Programa permite carregar para o simulador um novo programa gerado pelo p3as .

Escreve Memória escreve para um ficheiro o conteúdo actual da memória. O ficheiro gerado é texto com uma posição de memória por cada linha, com endereço e conteúdo dessa posição. Todos estes valores são de 16 bits e estão em hexadecimal.

Carrega Memória carrega directamente algumas posições de memória. O ficheiro de entrada deve ser em texto, com o mesmo formato gerado pelo comando *Escreve Memória*, uma posição de memória por cada linha, com endereço e conteúdo dessa posição. Podem especificar-se o número de posições que se quiser e a sua ordem não é importante. Todos estes valores têm que estar em hexadecimal e ser de 16 bits.

Carrega ROM de Controlo permite alterar ao conteúdo da ROM da unidade de controlo. Esta opção é útil para modificar o micro-programa das instruções. O ficheiro de entrada deve ser texto, com uma posição de memória por linha. Em cada linha deve constar o endereço da posição a alterar (a ROM tem um barramento de endereços de 9 bits, portanto 512 posições de memória) e o novo valor a colocar nessa posição (cada posição desta ROM tem 32 bits), tudo em hexadecimal.

Carrega ROM A permite alterar ao conteúdo da ROM que faz o mapeamento de instruções. A ROM A é endereçada com o campo do código da instrução *assembly* presente no registo de instrução, colocando à saída o endereço de início da micro-rotina que realiza esta instrução na ROM de Controlo. Esta opção é útil para acrescentar novas instruções ou modificar o micro-programa de instruções já existentes. O ficheiro de entrada deve ser texto, com uma posição de memória por linha. Em cada linha deve constar o endereço da posição a alterar (esta ROM tem 64 posições) e o novo valor a colocar nessa posição (cada posição desta ROM tem 9 bits), tudo em hexadecimal.

Carrega ROM B permite alterar ao conteúdo da ROM que faz o mapeamento do modo de endereçamento. A ROM B é endereçada com o campo do modo de endereçamento da instrução *assembly* presente no registo de instrução, de acordo com a Figura 12.8 do livro, colocando à saída o endereço da sub-micro-rotina na ROM de Controlo que lê/escreve os operandos de acordo com esse modo. Esta opção é útil para acrescentar ou modificar os modos de endereçamento existentes. O ficheiro de entrada deve ser texto, com uma posição de memória por linha. Em

cada linha deve constar o endereço da posição a alterar (esta ROM tem 16 posições) e o novo valor a colocar nessa posição (cada posição desta ROM tem 9 bits), tudo em hexadecimal.

Sai saída do programa, perdendo-se toda a informação sobre o contexto da simulação.

- **Definições:**

menu com opções de configuração do próprio simulador.

Define IVAD define quais os vectores de interrupção associado a cada um dos botões de interrupção. Permite ainda desabilitar individualmente cada botão de interrupção. As alterações só têm efeito após se pressionar em *Guarda*.

Zona de Memória permite alterar qual a gama de posições de memória visualizadas na secção da memória (ver Secção 4.2.4).

Zona de Programa permite alterar o número de posições de memória visualizadas na secção de programa desassemblado (ver Secção 4.2.5).

- **Comandos:**

os comandos deste menu são os mesmos que os descritos na Secção 4.2.6. A razão da duplicação é que por vezes pode ser útil ter este menu fixo numa janela pequena e independente.

- **Depuração:**

neste menu estão um conjunto de opções que facilitam a depuração de programas.

Pontos de Paragem esta opção lista os pontos de paragem (ou *breakpoints*, endereços onde a execução do programa pára) que estão definidos. Para apagar todos os pontos de paragem basta clicar em *Apaga Todos*. Para apagar um determinado ponto de paragem deve-se clicar sobre ele (quer nesta janela quer na do programa) e depois clicar em *Apaga*. Para definir um novo ponto de paragem numa dada linha do código, deve-se seleccionar essa linha na janela do programa e depois clicar em *Adiciona*.

Escreve Registo permite alterar directamente o conteúdo dos registos. O valor deve estar em hexadecimal.

Escreve Memória permite alterar directamente uma posição de memória. Os valores do endereço e conteúdo devem estar em hexadecimal. Importante: se se alterar o conteúdo de uma posição correspondente ao código, a janela de programa não será actualizada (não há uma nova desassemblagem do programa), e, portanto, haverá alguma inconsistência.

- **Ver:**

este menu tem opções para activar/desactivar janelas ou informação extra no simulador.

Ver Controlo estende ou reduz a interface do simulador, permitindo visualizar informação interna da unidade de controlo. Este modo de funcionamento é descrito na Secção 4.4.

Ver ROMs cria ou elimina uma janela que mostra o conteúdo de cada posição de memória das três ROMs da unidade de controlo: ROM de mapeamento A, ROM de mapeamento B e ROM de Controlo.

Janela Texto cria ou elimina a janela de entrada e saída de texto. Como descrito na Secção 4.6.1, as entradas/saídas para esta janela estão mapeadas nos endereços `FFFCh` a `FFFFh`. Portanto, leituras e escrita para esta gama de endereços controlam este dispositivo de acordo com o descrito nessa secção.

Janela Placa cria ou elimina a janela de entrada e saída que emula a placa DIO5 da Digilent, com:

- um *display* LCD, com 16 colunas e duas linhas;
- 4 *displays* de 7 segmentos;
- 16 LEDs individuais;
- 8 interruptores;
- 15 botões de pressão (na placa DIO5, existe um 16º botão que não está a ser utilizado com o P3).

Os endereços de controlo para estes dispositivos estão descritos na Secção 4.6.2.

4.2.2 Contadores de Instrução e Ciclos de Relógio

Por baixo dos menus, existe uma secção que mostra o número de instruções e o número de ciclos de relógio que decorreram desde que se efectuou o último *reset* ao processador.

4.2.3 Registos

A secção imediatamente abaixo à esquerda indica o valor actual de cada registo da unidade de processamento. São apresentados os registos de uso genérico (R0 a R7), o contador de programa PC (*program counter*) e o apontador para o topo da pilha SP (*stack pointer*). Todos os valores estão em hexadecimal, com 16 bits.

Estão também indicados os bits de estado (*flags*) do sistema (cujo valor é, naturalmente, 0 ou 1): O, excesso ou *overflow*; C, transporte ou *carry*; N, sinal ou *negative*; Z, zero; e E, *enable interrupt*.

4.2.4 Conteúdo da Memória

Nesta secção é mostrado o conteúdo das diferentes posições de memória. Por razões de eficiência, não é possível ter acesso a todas as posições de memória simultaneamente. Assim, optou-se por dar acesso a duas zonas diferentes da memória, o que se traduz na divisória ao meio desta secção. Inicialmente, a parte de cima aponta para a zona de memória onde tipicamente estão os dados e a parte de baixo para a zona da pilha e tabela de interrupção, com os valores:

	início	fim	posições
parte de cima:	8000h	81FFh	512
parte de baixo:	FD00h	FEFFh	512

Pelo menu *Definições*, é possível definir o endereço de início e o número de posições de memória a visualizar em cada uma destas zonas. Um aumento do número de posições a visualizar torna a execução do simulador mais lenta.

Em cada linha são apresentadas 8 posições de memória consecutivas. O endereço da primeira destas posições é o primeiro número da linha. Os seguintes 8 valores são o conteúdo dessas posições. Mais uma vez, todos os valores estão em hexadecimal e são de 16 bits. No final de cada linha estão os 8 caracteres com os códigos ASCII das posições de memória dessa linha. Caso o valor não corresponda ao código ASCII de um carácter alfa-numérico, é usado o carácter ' '.

4.2.5 Programa Desassemblado

Na secção em baixo à esquerda é apresentado o programa desassemblado. Sempre que um novo programa é carregado para o simulador, é feita a sua desassemblagem. Este processo consiste em interpretar os valores binários do ficheiro de entrada e imprimir a instrução *assembly* que lhes corresponde. Notar que não se tem acesso às etiquetas usadas no ficheiro *assembly* original, logo todos os valores são numéricos.

A barra escura indica a próxima instrução a ser executada. No entanto, esta pode ser colocada em qualquer instrução, clicando em cima dela. Isto permite que seja aí colocado um ponto de paragem, através da opção *Pontos de Paragem* do menu *Depuração*. As instruções com pontos de paragem são antecedidas no código com o sinal '»'. Para se remover um ponto de paragem pode-se clicar sobre essa instrução e fazer *Apaga* na mesma opção do menu *Depuração*.

Quando o programa se está a executar e pára num dado ponto de paragem, tal é assinalado pela cor vermelha da barra de selecção.

4.2.6 Comandos de Execução e Interrupção

No canto inferior direito estão os comandos que controlam a execução do programa:

Instrução – executa uma única instrução *assembly*.

Corre – reinicia o programa e executa-o indefinidamente ou até parar num ponto de paragem. O utilizador pode parar o programa em qualquer altura clicando no botão *Parar*.

Reinicia – faz *reset* ao processador, colocando todos os registos a 0, excepto o PC que é colocado com o valor do endereço de início do programa.

Continua – continua a execução do programa a partir da instrução corrente. Este botão transforma-se num botão *Parar* permitindo ao utilizador parar a execução do programa em qualquer altura.

Refresca – actualiza a janela do programa sem parar a sua execução, mostrando o conteúdo da memória e dos registos na altura em que se clicou neste botão.

4.3 Depuração

Tipicamente, as ferramentas disponíveis para ajudar na depuração de um programa em *assembly* são muito limitadas. A funcionalidade destas ferramentas é replicada no simulador *p3sim*.

Para testar a funcionalidade de uma secção do código, começa-se por colocar um ponto de paragem (como indicado atrás) no início dessa secção e dá-se o comando *Corre*. Após a sua paragem, executa-se o programa passo-a-passo, verificando se o fluxo do programa é o previsto e se depois de cada instrução os registos, bits de estado e posições de memória foram alterados de acordo com o esperado. Caso tal não aconteça, é possível que se tenha que repetir este procedimento para se tentar perceber porque é que o comportamento do programa é diferente do esperado.

Por vezes é desejável criar artificialmente as condições que se quer testar. Para isso podem-se carregar os registos/posições de memória com os valores necessários para o teste que se pretende.

Basicamente, são estes os procedimentos a seguir. Portanto, a não ser que se tenha uma intuição muito apurada para depuração de programas *assembly* que dê uma ideia muito boa de onde o erro poderá estar a surgir, é vivamente recomendado que o teste dos programas seja feito módulo a módulo. Só depois de os módulos terem sido testados separadamente sob condições típicas e se ter bastante confiança no seu correcto funcionamento é que se deve começar a juntá-los e a testá-los em conjunto.

4.4 Unidade de Controlo

O simulador *p3sim* faz simulação ao nível do micro-código. Para se ter acesso à informação interna da unidade de controlo (portanto informação que não está disponível a nível da programação *assembly*) deve-se seleccionar a opção *Ver controlo* do menu *Ver*. Após esta selecção a interface é estendida, ficando como mostra a Figura 2.

Em particular, temos mais uma secção na janela da interface com os registos internos da unidade de controlo e mais um botão (*Clock*) na secção de comandos de execução.

4.4.1 Registos Internos à Unidade de Controlo

A secção que aparece entre os registos e o conteúdo da memória mostra os valores dos registos internos à unidade de controlo. São registos que não são vistos pelo programador, mas que são usados pelos micro-programas das instruções do processador.

Os registos apresentados são:

R8–R13 – conjunto de 6 registos de 16 bits de uso genérico para os micro-programas. Destes, os 3 últimos têm significados especiais pela maneira como são usados na estrutura dos micro-programas do processador:

R11 : também chamado de *SD* (*source data*), pois na fase de *operand fetch* da instrução é carregado com o valor do operando origem (*source*).

R12 : também chamado de *EA* (*effective address*), pois na fase de *operand fetch* da instrução é carregado com o endereço de memória onde eventualmente se vai buscar um dos operandos (aquele que não é usado em modo registo) e, na fase de *write-back*, onde se guarda o resultado caso o operando destino esteja em memória.

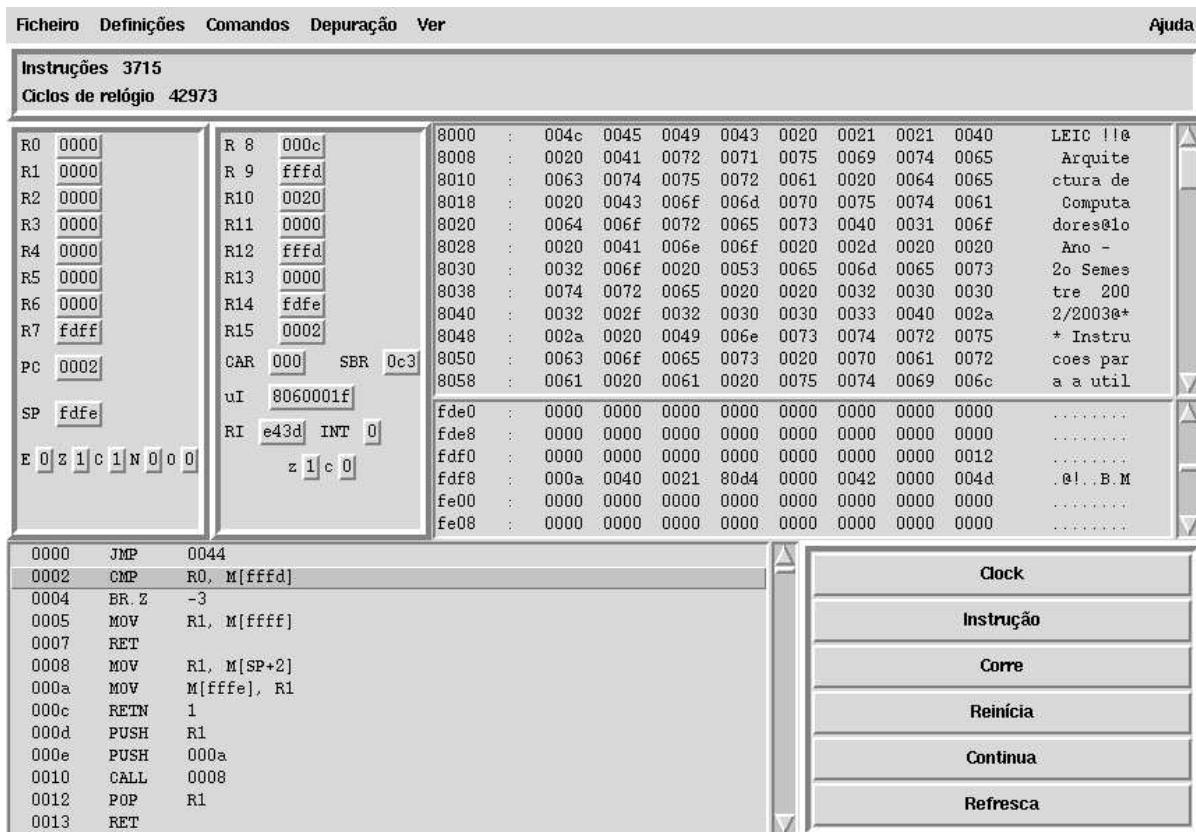


Figura 2: Interface do simulador estendida com a informação de controlo.

R13 : também chamado de RD (*result data*), pois na fase de *operand fetch* da instrução é carregado com o valor do operando destino e fica com o valor do resultado, a ser usado na fase de *write-back*.

R14 – de facto, este é o registo apontador da pilha, SP, ou seja, o registo SP está no banco de registos e corresponde ao R14.

R15 – de igual forma, este é o registo contador de programa, PC.

CAR – *control address register*, contém o endereço da ROM de Controlo com a micro-instrução a executar no próximo ciclo de relógio. Registo de 9 bits.

SBR – *subroutine branch register*, guarda o endereço de retorno quando se executa uma chamada a uma sub-rotina dentro de um micro-programa. Registo de 9 bits.

uI – *micro-instruction*, micro-instrução a ser executada no próximo ciclo de relógio. A micro-instrução tem 32 bits.

IR – *instruction register*, contém a instrução *assembly* que está a ser executada. Registo de 16 bits.

INT – *interrupt*, indica se existe ou não uma interrupção pendente, tomando os valores 1 ou 0 respectivamente.

z, c – bits de estado zero e transporte à saída da ULA, invisíveis ao programador e, portanto, apenas úteis na micro-programação. São actualizados todos os ciclos de relógio, ao contrário dos bits de estado em *assembly* cuja actualização ou não é controlada pelo micro-programa. Tomam os valores 0 ou 1.

4.4.2 Botão Clock

Este botão extra permite executar apenas um ciclo de relógio de cada vez. A sua utilidade é permitir seguir o funcionamento de um micro-programa, micro-instrução a micro-instrução. Para acabar a execução da instrução *assembly* actual pode usar-se o botão *Instrução*, que executa os ciclos de relógio necessários para chegar novamente ao início do ciclo de *fetch*.

Notar que o PC pode ficar momentaneamente numa zona inválida quando se carrega no botão *Clock*, o que é indicado pela mensagem “A posição apontada pelo PC não contém uma instrução válida”. Isto deve-se a que, nas instruções que ocupam duas posições de memória, o PC possa ficar momentaneamente a apontar para a segunda posição de memória dessa instrução, que não corresponde a uma instrução *assembly*. Uma vez lida essa posição de memória, o PC é de novo incrementado, voltando a uma posição válida.

4.5 Micro-Programação

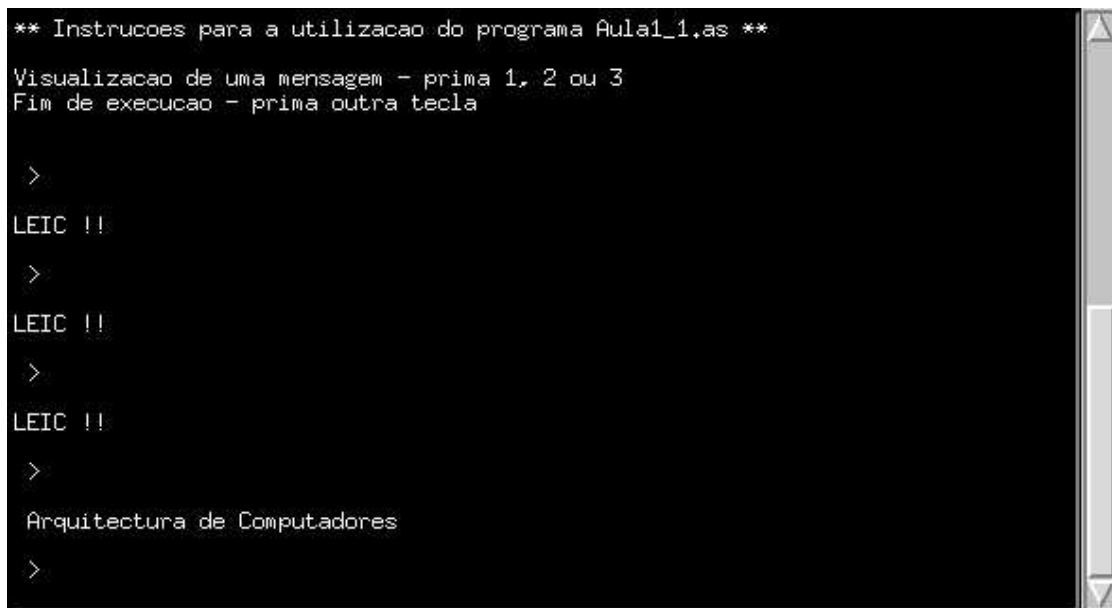
O simulador p3sim está desenvolvido de forma a permitir modificar o funcionamento das instruções *assembly* do processador e mesmo introduzir novas instruções. Este processo envolve modificar algumas posições de memória das ROMs do processador: a ROM de Controlo e as ROMs de mapeamento, A e B. O conteúdo destas ROMs é apresentado no Anexo B.

A alteração de uma instrução pode, em princípio, ser feita modificando certas posições da ROM de controlo. Para isso, tem que se analisar o micro-programa da instrução *assembly* a alterar e identificar quais as posições do micro-programa que devem ser alteradas. Basta então criar um ficheiro de texto com uma linha por cada micro-instrução a alterar. Em cada linha deve constar o endereço da ROM de controlo a alterar seguido do valor desejado para essa posição, todos os valores em hexadecimal. Este ficheiro deve depois ser carregado usando a opção *Carrega ROM de Controlo* do menu *Ficheiro*. O formato usado para as micro-instruções está apresentado no Anexo B.

Para adicionar uma instrução, é necessário:

1. arranjar um código de instrução (*opcode*) único.
2. desenvolver o micro-programa para essa instrução.
3. arranjar um espaço livre na ROM de Controlo onde esse micro-programa vai ser colocado. No caso do p3sim, as posições livres são a partir do endereço 112h, inclusive.
4. carregar o micro-programa, conforme descrito no parágrafo anterior.
5. modificar a ROM de mapeamento A, colocando no endereço correspondente ao código da instrução nova o endereço da ROM de Controlo onde se colocou o micro-programa, usando o mesmo procedimento que o usado para a alteração da ROM de controlo.

O conteúdo das ROMs do processador pode ser confirmado seleccionando a opção *Ver ROMs* do menu *Ver*.



```
** Instrucoes para a utilizacao do programa Aula1_1.as **
Visualizacao de uma mensagem - prima 1, 2 ou 3
Fim de execucao - prima outra tecla

>
LEIC !!
>
LEIC !!
>
LEIC !!
>
>
Arquitectura de Computadores
>
```

Figura 3: Janela de interface de texto, com 24 linhas e 80 colunas.

A depuração do micro-programa pode ser feito seguindo passo-a-passo (que a este nível é equivalente a ciclo de relógio-a-ciclo de relógio) a sua execução com o botão *Clock* e verificando o fluxo e as alterações que o micro-programa provoca nos diferentes registos.

4.6 Dispositivos de Entrada e Saída

O simulador disponibiliza um conjunto de dispositivos de entrada e saída através de duas janelas que podem ser abertas através do menu *Ver*. Cada um destes dispositivos poderá ser acedido por um ou mais portos. Sendo o espaço de endereçamento de IO mapeado no espaço de endereçamento de memória, a cada porto corresponderá um endereço de memória. Estes portos podem ser de leitura, de escrita ou de leitura e escrita. Escritas para portos só de leitura são ignoradas. Leituras de portos de escrita retornam todos os bits a 1, ou seja, `FFFFh`.

4.6.1 Janela Texto

Esta janela, apresentada na Figura 3, permite uma interface a nível de texto, permitindo ler caracteres do teclado e escrever caracteres para o monitor. Para aceder a este dispositivo estão reservados 4 portos:

porto de leitura, endereço `FFFFh` : uma leitura deste porto retorna o código ASCII do caracter correspondente à última tecla premida sobre a janela de texto. Portanto, no caso de se premir uma tecla antes da leitura da tecla anterior faz com que esta se perca. É possível testar se existe alguma tecla para ler através do porto de estado. Uma leitura deste porto sem que tenha havido uma tecla premida retorna o valor 0.

porto de escrita, endereço `FFFFh` : porto que permite escrever um dado caracter na janela de texto. O caracter com o código ASCII igual ao valor escrito para este porto é ecoado

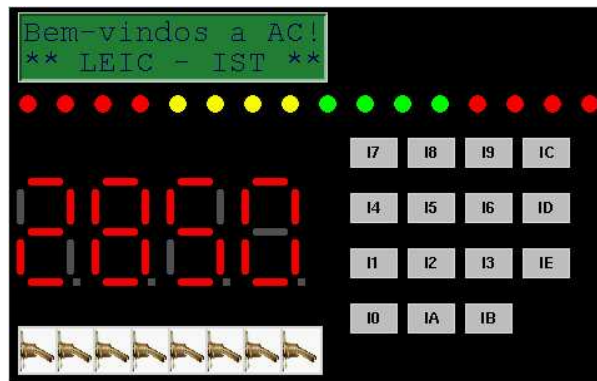


Figura 4: Janela de interface que emula a placa de entradas/saídas.

na janela. Esta janela mantém internamente um cursor onde este caracter é escrito. Sempre que se faz uma escrita, este cursor avança. É possível posicionar-se o cursor em qualquer ponto da janela através do porto de controlo.

porto de estado, endereço **FFDh** : porto que permite testar se existe ou não algum caracter para ler na janela de texto. Caso não haja, uma leitura deste porto retorna 0. Caso entretanto tenha sido premida uma tecla, este porto retorna 1. Assim que esta tecla for lida através do porto de leitura, este porto passa novamente a retornar 0.

porto de controlo, endereço **FFCh** : porto que permite posicionar o cursor na janela de texto, indicando onde será escrito o próximo caracter. Para tornar possível este posicionamento, tem que ser feita a sua inicialização, conseguida através da escrita do valor **FFFFh** para este porto¹. Uma vez inicializado, o cursor pode ser posicionado numa dada linha e coluna escrevendo para este porto um valor em que os 8 bits mais significativos indicam a linha (entre 0 e 23) e os 8 menos significativos a coluna (entre 1 e 80):

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Linha								Coluna							

4.6.2 Janela Placa

A Figura 4 apresenta a janela de interface que emula a placa DIO5 da Digilent, utilizada nas aulas práticas da disciplina de Arquitectura de Computadores da Licenciatura em Engenharia Informática e de Computadores do IST. Esta disponibiliza os dispositivos que a seguir se indica:

- 8 interruptores, endereço **FFF9h** : uma leitura deste endereço permite ler em simultâneo o estado do conjunto dos 8 interruptores. A cada interruptor corresponde um bit, correspondendo ao interruptor da direita o bit menos significativo e ao da esquerda o oitavo bit (os oito bits mais significativos vêm sempre a 0). Um interruptor para baixo coloca o bit respectivo a 0 e para cima a 1.

¹Um efeito secundário desta inicialização é limpar todo o conteúdo da janela.

- LEDs, endereço **FFF8h** : conjunto de 16 LEDs cujo estado individual, ligado ou desligado, é definido por uma escrita para este porto. A cada LED correspondem 1 bit da palavra de dados, sendo o LED da direita controlado pelo bit menos significativo e os restantes LEDs por cada um dos restantes bits, por ordem.
- *display* de 7 segmentos, endereços **FFF0** , **FFF1h** , **FFF2h** e **FFF3h** : cada um destes portos controla, da direita para a esquerda, um conjunto de 7 LEDs que formam um *display*. Os quatro bits menos significativos do valor escrito no porto determina o caracter hexadecimal (0 a F) que aparece no *display* respectivo.
- *display* LCD, endereços **FFF4h** e **FFF5h** : *display* com 16 colunas e 2 linhas de texto. Uma escrita para o porto **FFF5h** faz ecoar o caracter em código ASCII estendido correspondente aos 8 bits menos significativos do valor escrito. O porto **FFF4h** é um porto de controlo, em que os diferentes bits activos desencadeiam diferentes operações:

Bit	Acção
15	liga ou desliga o <i>display</i> LCD;
5	limpa o <i>display</i> LCD;
4	posiciona na linha 0 ou 1 o cursor (que indica a próxima posição a ser escrita);
3 a 0	posiciona o cursor na coluna especificada;

A escrita de um caracter não altera a posição do cursor, logo entre cada escrita é necessário actualizar a posição deste.

- 15 botões de pressão: estes não estão mapeados em memória, clicando num destes botões é gerada uma interrupção no programa com o correspondente vector de interrupção. É possível desabilitar estes botões, seleccionando a opção *Define IVAD* no menu *Definições* e clicar na respectiva caixa de selecção. É também aqui que se poder alterar o vector associado a cada um destes 15 botões de interrupção, que, por omissão, corresponde ao índice do botão.

4.6.3 Temporizador

O simulador **p3sim** disponibiliza, ainda em conformidade com a placa DIO5, um dispositivo temporizador que permite definir intervalos de tempo real. O temporizador é controlado por dois portos:

- unidades de contagem, endereço **FFF6h** : uma escrita para este endereço define o número de unidades de contagem, cada com a duração de 100ms. Por exemplo, para se ter um intervalo de 1s, deve ser escrito para endereço o valor 10. Uma leitura deste endereço permite obter o valor actual de contagem;
- porto de controlo, endereço **FFF7h** : este porto permite dar início ou parar uma contagem por escrita, respectivamente, de um 1 ou um 0 no bit menos significativo (os restantes bits são ignorados). Uma leitura deste endereço indica, no bit menos significativo, o estado do temporizador, em contagem ou parado.

A utilização normal deste dispositivo consiste em escrever no porto **FFF6h** o número de períodos de 100ms correspondente ao intervalo de tempo pretendido, seguido de uma escrita

do valor 1 no porto `FFF7h` . Deverá ser associada ao vector de interrupção 15 a rotina que deverá tratar a indicação do final deste intervalo.

4.6.4 Máscara de Interrupções

Um último porto de saída, no endereço `FFFAh` , está associado à máscara de interrupções. Esta máscara permite habilitar ou desabilitar cada um dos 16 primeiros vectores de interrupção individualmente, definido pela escrita de um padrão de bits a 1 e a 0, respectivamente. Por exemplo, para apenas se habilitar as interrupções vindas do temporizador, deverá ser escrito para este endereço o valor `8000h` . Uma leitura deste endereço indica a situação actual da máscara.

A Tabela 2 resume o conjunto de dispositivos de entrada/saída do simulador `p3sim` .

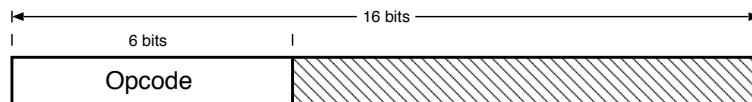
Endereço	Dispositivo	Descrição	Acção
FFF0h	Display 7 segmentos 0	Permite escrever no <i>display</i> de 7 segmentos mais à direita. Só são considerados os 4 bits menos significativos escritos no endereço.	Escrita
FFF1h	Display 7 segmentos 1	Idem para o <i>display</i> à esquerda do anterior.	Escrita
FFF2h	Display 7 segmentos 2	Idem para o <i>display</i> à esquerda do anterior.	Escrita
FFF3h	Display 7 segmentos 3	Idem para o <i>display</i> à esquerda do anterior.	Escrita
FFF4h	LCD	Permite enviar sinais de controlo para o LCD.	Escrita
FFF5h	LCD	Permite escrever um caracter no LCD cujo código ASCII estendido foi escrito no endereço.	Escrita
FFF6h	Temporizador	Valor do contador associado ao temporizador.	Leitura/Escrita
FFF7h	Temporizador	Arranca ou pára o temporizador.	Leitura/Escrita
FFF8h	LEDs	Permite acender os LEDs correspondentes ao valor em binário que se escreve no endereço. O LED da direita corresponde ao bit menos significativo.	Escrita
FFF9h	Interruptores	Permite ler, nos 8 bits menos significativos, o valor definido pela posição dos interruptores. O interruptor da direita corresponde ao bit menos significativo.	Leitura
FFFAh	Máscara de interrupções	Permite definir os vectores de interrupção habilitados, um por cada bit da máscara.	Leitura/Escrita
FFFBh	Janela de texto	Permite colocar o cursor numa dada posição da janela.	Escrita
FFFDh	Janela de texto	Permite testar se houve alguma tecla primida.	Leitura
FFFEh	Janela de texto	Permite escrever um caracter na janela.	Escrita
FFFFh	Janela de texto	Permite ler a última tecla primida.	Escrita

Tabela 2: Resumo dos dispositivos de entrada e saída.

A Formatos das Instruções Assembly

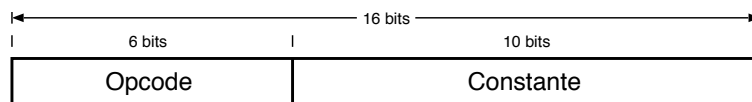
Instruções de 0 operandos

NOP , ENI , DSI , STC , CLC , CMC , RET e RTI



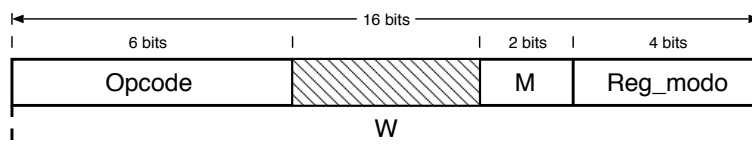
Instruções de 0 operandos com constante

RETN e INT



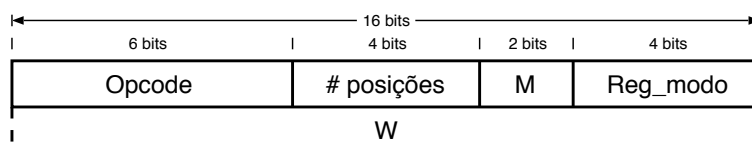
Instruções de 1 operando

NEG , INC , DEC , COM , PUSH e POP



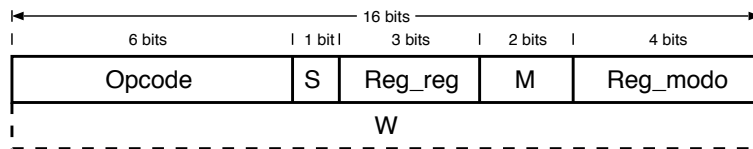
Instruções de 1 operando com constante

SHR , SHL , SHRA , SHLA , ROR , ROL , RORC , ROLC



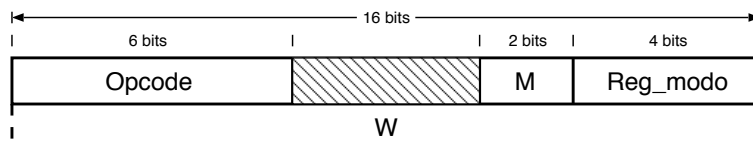
Instruções de 2 operandos

CMP , ADD , ADDC , SUB , SUBB , MUL , DIV , TEST , AND , OR , XOR , MOV , MVL , MVBH e XCH



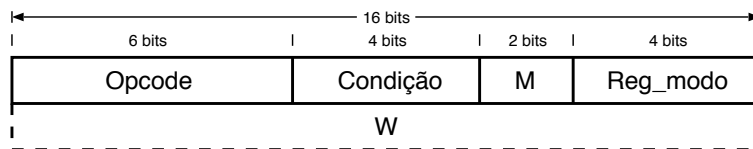
Instruções de salto absoluto incondicional

JMP , CALL



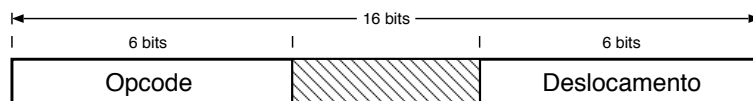
Instruções de salto absoluto condicional

JMP .cond, CALL. cond



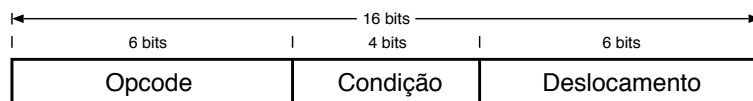
Instrução de salto relativo incondicional

BR



Instrução de salto relativo condicional

BR. cond



Codificação da condição de salto

Condição	Mnemónica	Código
Zero	Z	0000
Não zero	NZ	0001
Transporte	C	0010
Não transporte	NC	0011
Negativo	N	0100
Não negativo	NN	0101
Excesso	O	0110
Não excesso	NO	0111
Positivo	P	1000
Não positivo	NP	1001
Interrupção	I	1010
Não interrupção	NI	1011

Códigos de Operação

Mnemónica	Código	Mnemónica	Código
NOP	000000	CMP	100000
ENI	000001	ADD	100001
DSI	000010	ADDC	100010
STC	000011	SUB	100011
CLC	000100	SUBB	100100
CMC	000101	MUL	100101
RET	000110	DIV	100110
RTI	000111	TEST	100111
INT	001000	AND	101000
RETN	001001	OR	101001
NEG	010000	XOR	101010
INC	010001	MOV	101011
DEC	010010	MVBH	101100
COM	010011	MVBL	101101
PUSH	010100	XCH	101110
POP	010101	JMP	110000
SHR	011000	JMP.cond	110001
SHL	011001	CALL	110010
SHRA	011010	CALL.cond	110011
SHLA	011011	BR	111000
ROR	011100	BR.cond	111001
ROL	011101		
RORC	011110		
ROLC	011111		

Modos de Endereçamento

M	Endereçamento	Operação
00	Por registo	$op = RX$
01	Por registo indirecto	$op = M[RX]$
10	Imediato	$op = W$
11	Indexado, directo, relativo ou baseado	$op = M[RX+W]$

Seleção do operando com o modo de endereçamento

S	Operando
0	Destino
1	Origem

B Conteúdo das ROMs de Controlo

Em apêndice, inclui-se a listagem do conteúdo das ROMs da Unidade de Controlo do processador P3 . Estas ROMs podem ser modificadas conforme descrito na Secção 4.5 de forma a acrescentar uma instrução *assembly* ou a alterar o comportamento de uma já existente.

ROM B

Endereco	Conteúdo	Modo
0 - 0000	0x00a	F1R0
1 - 0001	0x00b	F1RI0
2 - 0010	0x00d	F1IM0
3 - 0011	0x00f	F1IN0
4 - 0100	0x02d	WER0
5 - 0101	0x02f	WEM0
6 - 0110	0x02d	WER0
7 - 0111	0x02f	WEM0
8 - 1000	0x013	F2R0
9 - 1001	0x017	F2RI0
10 - 1010	0x01d	F2IM0
11 - 1011	0x023	F2IN0
12 - 1100	0x015	F2RS0
13 - 1101	0x01a	F2RIS0
14 - 1110	0x020	F2IMS0
15 - 1111	0x028	F2INS0

ROM A

62 - 111110 0x0 Livre
63 - 111111 0x0 Livre

Endereco	Conteudo	Instrucao
0 - 000000	0x032	NOP
1 - 000001	0x033	ENI0
2 - 000010	0x037	DSI0
3 - 000011	0x03b	STC0
4 - 000100	0x03e	CLC0
5 - 000101	0x040	CMC0
6 - 000110	0x044	RET0
7 - 000111	0x047	RTI0
8 - 001000	0x04c	INT0
9 - 001001	0x055	RETN0
10 - 001010	0x0	Livre
11 - 001011	0x0	Livre
12 - 001100	0x0	Livre
13 - 001101	0x0	Livre
14 - 001110	0x0	Livre
15 - 001111	0x0	Livre
16 - 010000	0x05b	NEG0
17 - 010001	0x05e	INC0
18 - 010010	0x060	DEC0
19 - 010011	0x062	COM0
20 - 010100	0x064	PUSH0
21 - 010101	0x067	POP0
22 - 010110	0x0	Livre
23 - 010111	0x0	Livre
24 - 011000	0x06a	SHR0
25 - 011001	0x071	SHL0
26 - 011010	0x078	SHRA0
27 - 011011	0x07f	SHLA0
28 - 011100	0x08c	ROR0
29 - 011101	0x093	ROL0
30 - 011110	0x09a	RORC0
31 - 011111	0x0a1	ROLC0
32 - 100000	0x0c2	CMF0
33 - 100001	0x0b4	ADD0
34 - 100010	0x0b6	ADDC0
35 - 100011	0x0b8	SUB0
36 - 100100	0x0ba	SUBB0
37 - 100101	0x0cf	MUL0
38 - 100110	0x0dd	DIV0
39 - 100111	0x0c4	TEST0
40 - 101000	0x0bc	AND0
41 - 101001	0x0be	OR0
42 - 101010	0x0c0	XOR0
43 - 101011	0x0a8	MOV0
44 - 101100	0x0af	MVBH0
45 - 101101	0x0aa	MVEL0
46 - 101110	0x0ca	XCH0
47 - 101111	0x0	Livre
48 - 110000	0x102	JMP.C0
49 - 110001	0x105	JMP
50 - 110010	0x109	CALL.C0
51 - 110011	0x10d	CALL
52 - 110100	0x0	Livre
53 - 110101	0x0	Livre
54 - 110110	0x0	Livre
55 - 110111	0x0	Livre
56 - 111000	0x0f9	BR.C0
57 - 111001	0x0f8	BR
58 - 111010	0x0	Livre
59 - 111011	0x0	Livre
60 - 111100	0x0	Livre
61 - 111101	0x0	Livre

ROM de Controle

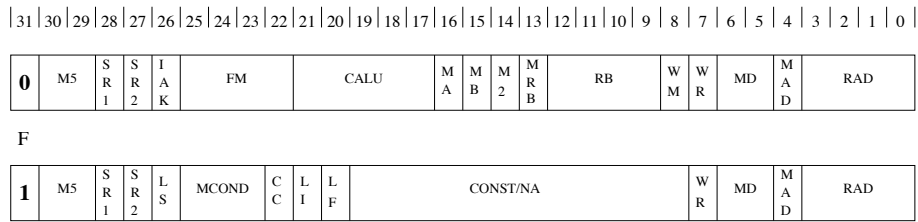


Figura 5: Formato das micro-instruções.

Endereco			Conteúdo	Etiqueta	Operação
000	000h	00000000b	0x8060001f	IF0	IR←M[PC]
001	001h	000000001b	0x400a009f	IF1	PC←PC+1, CAR←ROMA[OP]
002	002h	000000010b	0x81c000d8	IH0	R8←RE, !EINT?CAR←IF0
003	003h	000000011b	0x0008319e	IH1	M[SP]←R8, SP←SP-1
004	004h	000000100b	0x04083f9e	IH2	M[SP]←PC, SP←SP-1, IAK←1
005	005h	000000101b	0x000000b9	IH3	R9←INTADDR
006	006h	000000110b	0x804200f8	IH4	R8←0200h
007	007h	000000111b	0x00023099	IH5	R9←R9-R8
008	008h	000001000b	0x000132bf	IH6	PC←M[R9]
009	009h	000001001b	0x80100010	IH7	RE←R0, CAR←IF0
010	00ah	000001010b	0x2031009d	F1R0	RD←R[IR1], CAR←SBR
011	00bh	000001011b	0x0031009c	F1RI0	EA←R[IR1]
012	00ch	000001100b	0x200138bd	F1RI1	RD←M[EA], CAR←SBR
013	00dh	000001101b	0x00013ebd	F1IM0	RD←M[PC]
014	00eh	000001110b	0x200a009f	F1IM1	PC←PC+1, CAR←SBR
015	00fh	000001111b	0x00013ebc	F1IN0	EA←M[PC]
016	010h	000010000b	0x000a009f	F1IN1	PC←PC+1
017	011h	000010001b	0x0000009c	F1IN2	EA←EA+R[IR1]
018	012h	000010010b	0x200138bd	F1IN3	RD←M[EA], CAR←SBR
019	013h	000010011b	0x0031009d	F2R0	RD←R[IR1]
020	014h	000010100b	0x2031409b	F2R1	SD←R[IR2], CAR←SBR
021	015h	000010101b	0x0031009b	F2RS0	SD←R[IR1]
022	016h	000010110b	0x2031409d	F2RS1	RD←R[IR2], CAR←SBR
023	017h	000010111b	0x0031009c	F2RI0	EA←R[IR1]
024	018h	000011000b	0x000138bd	F2RI1	RD←M[EA]
025	019h	000011001b	0x2031409b	F2RI2	SD←R[IR2], CAR←SBR
026	01ah	000011010b	0x0031009c	F2RIS0	EA←R[IR1]
027	01bh	000011011b	0x000138bb	F2RIS1	SD←M[EA]
028	01ch	000011100b	0x2031409d	F2RIS2	RD←R[IR2], CAR←SBR
029	01dh	000011101b	0x00013ebd	F2IM0	RD←M[PC]
030	01eh	000011110b	0x000a009f	F2IM1	PC←PC+1
031	01fh	000011111b	0x2031409b	F2IM2	SD←R[IR2], CAR←SBR
032	020h	000100000b	0x00013ebb	F2IMS0	SD←M[PC]
033	021h	000100001b	0x000a009f	F2IMS1	PC←PC+1
034	022h	000100010b	0x2031409d	F2IMS2	RD←R[IR2], CAR←SBR
035	023h	000100011b	0x00013ebc	F2IN0	EA←M[PC]
036	024h	000100100b	0x000a009f	F2IN1	PC←PC+1
037	025h	000100101b	0x0000009c	F2IN2	EA←EA+R[IR1]
038	026h	000100110b	0x000138bd	F2IN3	RD←M[EA]
039	027h	000100111b	0x2031409b	F2IN4	SD←R[IR2], CAR←SBR
040	028h	000101000b	0x00013ebc	F2INS0	EA←M[PC]
041	029h	000101001b	0x000a009f	F2INS1	PC←PC+1
042	02ah	000101010b	0x0000009c	F2INS2	EA←EA+R[IR1]
043	02bh	000101011b	0x000138bb	F2INS3	SD←M[EA]
044	02ch	000101100b	0x2031409d	F2INS4	RD←R[IR2], CAR←SBR
045	02dh	000101101b	0x00313a80	WBR0	R[WBR]←RD

046	02eh	000101110b	0x80000200	WER1	CAR<-IH0
047	02fh	000101111b	0x83002d00	WEM0	S?CAR<-WER0 (modo no outro)
048	030h	000110000b	0x00003b1c	WEM1	M[EA]<-RD
049	031h	000110001b	0x80000200	WEM2	CAR<-IH0
050	032h	000110010b	0x80000200	NOPO	CAR<-IH0
051	033h	000110011b	0x804010f8	ENI0	R8<-0010h
052	034h	000110100b	0x000000d9	ENI1	R9<-RE
053	035h	000110101b	0x00143298	ENI2	R8<-R8 or R9
054	036h	000110110b	0x80100218	ENI3	RE<-R8, CAR<-IH0
055	037h	000110111b	0x80400ff8	DSI0	R8<-000fh
056	038h	000111000b	0x000000d9	DSI1	R9<-RE
057	039h	000111001b	0x00123298	DSI2	R8<-R8 and R9
058	03ah	000111010b	0x80100218	DSI3	RE<-R8, CAR<-IH0
059	03bh	000111011b	0x00112098	STC0	R8<-not R0
060	03ch	000111100b	0x010a0018	STC1	R8+1, flag C
061	03dh	000111101b	0x80000200	STC2	CAR<-IH0
062	03eh	000111110b	0x01002010	CLC0	R0+R0, flag C
063	03fh	000111111b	0x80000200	CLC1	CAR<-IH0
064	040h	001000000b	0x804004f8	CMC0	R8<-0004
065	041h	001000001b	0x000000d9	CMC1	R9<-RE
066	042h	001000010b	0x00163298	CMC2	R8<-R8 exor R9
067	043h	001000011b	0x80100218	CMC3	RE<-R8, CAR<-IH0
068	044h	001000100b	0x000a009e	RET0	SP<-SP+1
069	045h	001000101b	0x00013cbf	RET1	PC<-M[SP]
070	046h	001000110b	0x80000200	RET2	CAR<-IH0
071	047h	001000111b	0x000a009e	RTI0	SP<-SP+1
072	048h	001001000b	0x00013cbf	RTI1	PC<-M[SP]
073	049h	001001001b	0x000a009e	RTI2	SP<-SP+1
074	04ah	001001010b	0x00013cb8	RTI3	R8<-M[SP]
075	04bh	001001011b	0x80100218	RTI4	RE<-R8, CAR<-IH0
076	04ch	001001100b	0x000000d8	INT0	R8<-RE
077	04dh	001001101b	0x0008319e	INT1	M[SP]<-R8, SP<-SP-1
078	04eh	001001110b	0x00083f9e	INT2	M[SP]<-PC, SP<-SP-1
079	04fh	001001111b	0x8040fff8	INT3	R8<-00ffh
080	050h	001010000b	0x00128098	INT4	R8<-IR and R8
081	051h	001010001b	0x804200f9	INT5	R9<-0200h
082	052h	001010010b	0x00023298	INT6	R8<-R8-R9
083	053h	001010011b	0x000130bf	INT7	PC<-M[R8]
084	054h	001010100b	0x80100010	INT8	RE<-R0, CAR<-IF0
085	055h	001010101b	0x000a009e	RETN0	SP<-SP+1
086	056h	001010110b	0x00013cbf	RETN1	PC<-M[SP]
087	057h	001010111b	0x8043fff8	RETN2	R8<-03ffh
088	058h	001011000b	0x00128098	RETN3	R8<-IR and R8
089	059h	001011001b	0x0000309e	RETN4	SP<-SP+R8
090	05ah	001011010b	0x80000200	RETN5	CAR<-IH0
091	05bh	001011011b	0xe40000f8	NEG0	R8<-0, SBR<-CAR+1, CAR<-F1
092	05ch	001011100b	0x03c23a98	NEG1	R8<-R8-RD, flags ZCNO
093	05dh	001011101b	0x7031309d	NEG2	RD<-R8, CAR<-WB
094	05eh	001011110b	0xe4000000	INC0	SBR<-CAR+1, CAR<-F1
095	05fh	001011111b	0x73ca009d	INC1	RD<-RD+1, flags ZCNO, CAR<-WB
096	060h	001100000b	0xe4000000	DEC0	SBR<-CAR+1, CAR<-F1
097	061h	001100001b	0x73c8009d	DEC1	RD<-RD-1, flags ZCNO, CAR<-WB
098	062h	001100010b	0xe4000000	COM0	SBR<-CAR+1, CAR<-F1
099	063h	001100011b	0x7290009d	COM1	RD<-!RD, flags ZN, CAR<-WB
100	064h	001100100b	0xe4000000	PUSH0	SBR<-CAR+1, CAR<-F1
101	065h	001100101b	0x00083b9e	PUSH1	M[SP]<-RD, SP<-SP-1
102	066h	001100110b	0x80000200	PUSH2	CAR<-IH0
103	067h	001100111b	0xe4000000	POP0	SBR<-CAR+1, CAR<-F1
104	068h	001101000b	0x000a009e	POP1	SP<-SP+1
105	069h	001101001b	0x70013cbd	POP2	RD<-M[SP], CAR<-WB
106	06ah	001101010b	0xe403c0f8	SHR0	R8<-03c0h, SBR<-CAR+1, CAR<-F1
107	06bh	001101011b	0x00128098	SHR1	R8<-R8 and IR
108	06ch	001101100b	0x804040f9	SHR2	R9<-0040h
109	06dh	001101101b	0x03a0009d	SHR3	RD<-shr RD, flags ZCN
110	06eh	001101110b	0x00023298	SHR4	R8<-R8-R9
111	06fh	001101111b	0x80c06d00	SHR5	!z?CAR<-SHR3

112	070h	001110000b	0x70000000	SHR6	CAR<-WB		
113	071h	001110001b	0xe403c0f8	SHL0	R8<-03c0h, SBR<-CAR+1, CAR<-F1		
114	072h	001110010b	0x00128098	SHL1	R8<-R8 and IR		
115	073h	001110011b	0x804040f9	SHL2	R9<-0040h		
116	074h	001110100b	0x03a2009d	SHL3	RD<-shl RD, flags ZCN		
117	075h	001110101b	0x00023298	SHL4	R8<-R8-R9		
118	076h	001110110b	0x80c07400	SHL5	!z?CAR<-SHL3		
119	077h	001110111b	0x70000000	SHL6	CAR<-WB		
120	078h	001111000b	0xe403c0f8	SHRA0	R8<-03c0h, SBR<-CAR+1, CAR<-F1		
121	079h	001111001b	0x00128098	SHRA1	R8<-R8 and IR		
122	07ah	001111010b	0x804040f9	SHRA2	R9<-0040h		
123	07bh	001111011b	0x03e4009d	SHRA3	RD<-shra RD, flags ZCNO		
124	07ch	001111100b	0x00023298	SHRA4	R8<-R8-R9		
125	07dh	001111101b	0x80c07b00	SHRA5	!z?CAR<-SHRA3		
126	07eh	001111110b	0x70000000	SHRA6	CAR<-WB		
127	07fh	001111111b	0xe403c0f8	SHLA0	R8<-03c0h, SBR<-CAR+1, CAR<-F1		
128	080h	010000000b	0x00128098	SHLA1	R8<-R8 and IR		
129	081h	010000001b	0x0031209a	SHLA2	R10<-R0		
130	082h	010000010b	0x03e6009d	SHLA3	RD<-shla RD, flags ZCNO		
131	083h	010000011b	0x000000d9	SHLA4	R9<-RE		
132	084h	010000100b	0x0014329a	SHLA5	R10<-R10 or R9		
133	085h	010000101b	0x804040f9	SHLA6	R9<-0040h		
134	086h	010000110b	0x00023298	SHLA7	R8<-R8-R9		
135	087h	010000111b	0x80c082d9	SHLA8	R9<-RE, !z?CAR<-SHLA3		
136	088h	010001000b	0x804001f8	SHLA9	R8<-1		
137	089h	010001001b	0x0012309a	SHLA10	R10<-R10 and R8		
138	08ah	010001010b	0x0014329a	SHLA11	R10<-R10 or R9		
139	08bh	010001011b	0xf010001a	SHLA12	RE<-R10, CAR<-WB		
140	08ch	010001100b	0xe403c0f8	ROR0	R8<-03c0h, SBR<-CAR+1, CAR<-F1		
141	08dh	010001101b	0x00128098	ROR1	R8<-R8 and IR		
142	08eh	010001110b	0x804040f9	ROR2	R9<-0040h		
143	08fh	010001111b	0x03a8009d	ROR3	RD<-ror RD, flags ZCN		
144	090h	010010000b	0x00023298	ROR4	R8<-R8-R9		
145	091h	010010001b	0x80c08f00	ROR5	!z?CAR<-ROR3		
146	092h	010010010b	0x70000000	ROR6	CAR<-WB		
147	093h	010010011b	0xe403c0f8	ROL0	R8<-03c0h, SBR<-CAR+1, CAR<-F1		
148	094h	010010100b	0x00128098	ROL1	R8<-R8 and IR		
149	095h	010010101b	0x804040f9	ROL2	R9<-0040h		
150	096h	010010110b	0x03aa009d	ROL3	RD<-rol RD, flags ZCN		
151	097h	010010111b	0x00023298	ROL4	R8<-R8-R9		
152	098h	010011000b	0x80c09600	ROL5	!z?CAR<-ROL3		
153	099h	010011001b	0x70000000	ROL6	CAR<-WB		
154	09ah	010011010b	0xe403c0f8	RORC0	R8<-03c0h, SBR<-CAR+1, CAR<-F1		
155	09bh	010011011b	0x00128098	RORC1	R8<-R8 and IR		
156	09ch	010011100b	0x804040f9	RORC2	R9<-0040h		
157	09dh	010011101b	0x03ac009d	RORC3	RD<-rorc RD, flags ZCN		
158	09eh	010011110b	0x00023298	RORC4	R8<-R8-R9		
159	09fh	010011111b	0x80c09d00	RORC5	!z?CAR<-RORC3		
160	0a0h	010100000b	0x70000000	RORC6	CAR<-WB		
161	0a1h	010100001b	0xe403c0f8	ROLC0	R8<-03c0h, SBR<-CAR+1, CAR<-F1		
162	0a2h	010100010b	0x00128098	ROLC1	R8<-R8 and IR		
163	0a3h	010100011b	0x804040f9	ROLC2	R9<-0040h		
164	0a4h	010100100b	0x03ae009d	ROLC3	RD<-rolc RD, flags ZCN		
165	0a5h	010100101b	0x00023298	ROLC4	R8<-R8-R9		
166	0a6h	010100110b	0x80c0a400	ROLC5	!z?CAR<-ROLC3		
167	0a7h	010100111b	0x70000000	ROLC6	CAR<-WB		
168	0a8h	010101000b	0xec000000	MOV0	SBR<-CAR+1, CAR<-F2		
169	0a9h	010101001b	0x7031369d	MOV1	RD<-SD, CAR<-WB		
170	0aah	010101010b	0xec00fff8	MVBL0	R8<-00ffh, SBR<-CAR+1, CAR<-F2		
171	0abh	010101011b	0x00113099	MVBL1	R9<-!R8		
172	0ach	010101100b	0x0012329d	MVBL2	RD<-RD and R9		
173	0adh	010101101b	0x00123698	MVBL3	R8<-R8 and SD		
174	0aeh	010101110b	0x7014309d	MVBL4	RD<-RD or R8, CAR<-WB		
175	0afh	010101111b	0xec00fff8	MVBH0	R8<-00ffh, SBR<-CAR+1, CAR<-F2		
176	0b0h	010110000b	0x00113099	MVBH1	R9<-!R8		
177	0b1h	010110001b	0x0012309d	MVBH2	RD<-RD and R8		

178	0b2h	010110010b	0x00123699	MVBH3	R9<-R9 and SD
179	0b3h	010110011b	0x7014329d	MVBH4	RD<-RD or R9, CAR<-WB
180	0b4h	010110100b	0xec000000	ADD0	SBR<-CAR+1, CAR<-F2
181	0b5h	010110101b	0x73c0369d	ADD1	RD<-RD+SD, flags ZCNO, CAR<-WB
182	0b6h	010110110b	0xec000000	ADDC0	SBR<-CAR+1, CAR<-F2
183	0b7h	010110111b	0x73c4369d	ADDC1	RD<-RD+SD+C, flags ZCNO, CAR<-WB
184	0b8h	010111000b	0xec000000	SUB0	SBR<-CAR+1, CAR<-F2
185	0b9h	010111001b	0x73c2369d	SUB1	RD<-RD-SD, flags ZCNO, CAR<-WB
186	0bah	010111010b	0xec000000	SUBB0	SBR<-CAR+1, CAR<-F2
187	0bbh	010111011b	0x73c6369d	SUBB1	RD<-RD-SD-C, flags ZCNO, CAR<-WB
188	0bch	010111100b	0xec000000	AND0	SBR<-CAR+1, CAR<-F2
189	0bdh	010111101b	0x7292369d	AND1	RD<-RD and SD, flags ZN, CAR<-WB
190	0beh	010111110b	0xec000000	OR0	SBR<-CAR+1, CAR<-F2
191	0bfh	010111111b	0x7294369d	OR1	RD<-RD or SD, flags ZN, CAR<-WB
192	0c0h	011000000b	0xec000000	XOR0	SBR<-CAR+1, CAR<-F2
193	0c1h	011000001b	0x7296369d	XOR1	RD<-RD xor SD, flags ZN, CAR<-WB
194	0c2h	011000010b	0xec000000	CMP0	SBR<-CAR+1, CAR<-F2
195	0c3h	011000011b	0x73c2361d	CMP1	RD<-RD-SD, flags ZCNO, CAR<-WB
196	0c4h	011000100b	0xec000000	TEST0	SBR<-CAR+1, CAR<-F2
197	0c5h	011000101b	0x7292361d	TEST1	RD<-RD and SD, flags ZN, CAR<-WB
198	0c6h	011000110b	0x8340c900	WSD0	!S?CAR<-WSD3 (mode on RD)
199	0c7h	011000111b	0x8240c900	WSD1	!M0?CAR<-WSD3 (mode REG or IMM)
200	0c8h	011001000b	0x7000371c	WSD2	M[EA]<-SD, CAR<-WB (mode MEM)
201	0c9h	011001001b	0x70317680	WSD3	R[!WER]<-SD, CAR<-WB (mode REG)
202	0cah	011001010b	0xec000000	XCH0	SBR<-CAR+1, CAR<-F2
203	0cbh	011001011b	0x00313a98	XCH1	R8<-RD
204	0cch	011001100b	0x0031369d	XCH2	RD<-SD
205	0cdh	011001101b	0x0031309b	XCH3	SD<-R8
206	0ceh	011001110b	0x8000c600	XCH4	CAR<-WSD0
207	0cfh	011001111b	0xec0010f8	MUL0	R8<-16, SBR<-CAR+1, CAR<-F2
208	0d0h	011010000b	0x000000da	MUL1	R10<-RE
209	0d1h	011010001b	0x0013b09a	MUL2	R10<-R10 and R8 (flag E)
210	0d2h	011010010b	0x00313a99	MUL3	R9<-RD
211	0d3h	011010011b	0x01f1209d	MUL4	RD<-R0, flags CNO (clear flags)
212	0d4h	011010100b	0x002c009b	MUL5	SD<-rorc SD
213	0d5h	011010101b	0x8150d71a	MUL6	RE<-R10, !c?CAR<-MUL8
214	0d6h	011010110b	0x0100329d	MUL7	RD<-RD+R9, flag C
215	0d7h	011010111b	0x012c009d	MUL8	RD<-rorc RD, flag C
216	0d8h	011011000b	0x00080098	MUL9	R8<-R8-1
217	0d9h	011011001b	0x80c0d400	MUL10	!z?CAR<-MUL5
218	0dah	011011010b	0x012c009b	MUL11	SD<-rorc SD, flag C (C=0)
219	0dbh	011011011b	0x0200361d	MUL12	RD+SD, flag Z
220	0dch	011011100b	0x8000c600	MUL13	CAR<-WSD0
221	0ddh	011011101b	0xec0000d8	DIV0	R8<-RE, SBR<-CAR+1, CAR<-F2
222	0deh	011011110b	0x0000201b	DIV1	SD<-SD+R0
223	0dfh	011011111b	0x80c0e300	DIV2	!z?CAR<-DIV6
224	0e0h	011100000b	0x804001f9	DIV3	R9<-0001 (divisao por 0!)
225	0e1h	011100001b	0x00143298	DIV4	R8<-R8 or R9
226	0e2h	011100010b	0x80100218	DIV5	RE<-R8, CAR<-IH0 (0<-1)
227	0e3h	011100011b	0x01c12099	DIV6	R9<-R0+R0, flags CNO (clear flag)
228	0e4h	011100100b	0x0002361d	DIV7	RD<-SD
229	0e5h	011100101b	0x8140f500	DIV8	!c?CAR<-DIV24 (result=0)
230	0e6h	011100110b	0x00312098	DIV9	R8<-R0
231	0e7h	011100111b	0x000a0098	DIV10	R8<-R8+1
232	0e8h	011101000b	0x0122009b	DIV11	SD<-shl SD, flag C
233	0e9h	011101001b	0x8100ec00	DIV12	c?CAR<-DIV15
234	0eah	011101010b	0x0002361d	DIV13	RD<-SD
235	0ebh	011101011b	0x8100e700	DIV14	c?CAR<-DIV10
236	0ech	011101100b	0x002c009b	DIV15	SD<-rorc SD
237	0edh	011101101b	0x0102369d	DIV16	RD<-RD-SD, flag C
238	0eeh	011101110b	0x8100f100	DIV17	c?CAR<-DIV20
239	0efh	011101111b	0x0000369d	DIV18	RD<-RD+SD (<0:repeo)
240	0f0h	011110000b	0x01300010	DIV19	R0, flag C (C<-0)
241	0f1h	011110001b	0x002e0099	DIV20	R9<-rolc R9
242	0f2h	011110010b	0x0020009b	DIV21	SD<-shr SD
243	0f3h	011110011b	0x00080098	DIV22	R8<-R8-1

244	0f4h	011110100b	0x80c0ed00	DIV23	!z?CAR<-DIV16
245	0f5h	011110101b	0x00313a9b	DIV24	SD<-RD
246	0f6h	011110110b	0x0331329d	DIV25	RD<-R9, flags ZC
247	0f7h	011110111b	0x8000c600	DIV26	CAR<-WSD0
248	0f8h	011111000b	0x83c00200	BR.C0	!COND?CAR<-IH0
249	0f9h	011111001b	0x80403ff8	BR0	R8<-003fh
250	0fah	011111010b	0x0013b099	BR1	R9<-R8 and RI
251	0fbh	011111011b	0x804020fa	BR2	R10<-0020h (teste do sinal)
252	0fch	011111100b	0x0012329a	BR3	R10<-R10 and R9
253	0fdh	011111101b	0x80810000	BR4	z?CAR<-BR7
254	0feh	011111110b	0x00100098	BR5	R8<-not R8
255	0ffh	011111111b	0x00143099	BR6	R9<-R9 or R8
256	100h	100000000b	0x0000329f	BR7	PC<-PC+R9
257	101h	100000001b	0x80000200	BR8	CAR<-IH0
258	102h	100000010b	0xe4000000	JMP0	SBR<-CAR+1, CAR<-F1
259	103h	100000011b	0x00313a9f	JMP1	PC<-RD
260	104h	100000100b	0x80000200	JMP2	CAR<-IH0
261	105h	100000101b	0xe4000000	JMP.C0	SBR<-CAR+1, CAR<-F1
262	106h	100000110b	0x83c00200	JMP.C1	!COND?CAR<-IH0
263	107h	100000111b	0x00313a9f	JMP.C2	PC<-RD
264	108h	100001000b	0x80000200	JMP.C3	CAR<-IH0
265	109h	100001001b	0xe4000000	CALL0	SBR<-CAR+1, CAR<-F1
266	10ah	100001010b	0x00083f9e	CALL1	M[SP]<-PC, SP<-SP-1
267	10bh	100001011b	0x00313a9f	CALL2	PC<-RD
268	10ch	100001100b	0x80000200	CALL3	CAR<-IH0
269	10dh	100001101b	0xe4000000	CALL.C0	SBR<-CAR+1, CAR<-F1
270	10eh	100001110b	0x83c00200	CALL.C1	!COND?CAR<-IH0
271	10fh	100001111b	0x00083f9e	CALL.C2	M[SP]<-PC, SP<-SP-1
272	110h	100010000b	0x00313a9f	CALL.C3	PC<-RD
273	111h	100010001b	0x80000200	CALL.C4	CAR<-IH0

(livre do endereço 274 ao 511)